

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI “FEDERICO II”



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEI MATERIALI E DELLA PRODUZIONE

CENTRO INTERUNIVERSITARIO DI RICERCA TIBS

**Dottorato di ricerca
In
Tecnologie e Sistemi di Produzione
XXIII ciclo**

**Applicazioni dei sistemi laser in processi di
taglio innovativi**

COORDINATORE

CH.MO PROF. G. GIORLEO

CANDIDATO

TUTOR

ING. NUNZIANTE PAGANO

CH.MA PROF.SSA I. DE IORIO

ANNO ACCADEMICO 2009/2010

Alla Curiosità....
....Madre indiscussa di ogni scienza.

INDICE

INTRODUZIONE	1
---------------------	----------

CAPITOLO 1: I Laser

1.1	Introduzione	4
1.2	Caratteristiche del fascio generato	5
1.3	Sistemi di trasporto e focalizzazione	14
1.4	Classificazione dei laser	15
1.5	Applicazioni industriali del laser	19
1.6	Considerazioni sulla sicurezza laser	25

CAPITOLO 2: Il taglio laser

2.1	Introduzione	26
2.2	Meccanismi di taglio	29
2.3	Vantaggi e svantaggi nell'uso della tecnologia laser	31
2.4	Difetti ed imperfezioni	32
2.5	Confronto con tecnologie alternative	36

CAPITOLO 3: Attrezzature sperimentali impiegate

3.1	Introduzione	39
3.2	Sistema Laser Rofin	
	3.2.1 Rofin-StarCut 150;	39
	3.2.2 Rofin-Star System Universal	41
3.3	Sistemi Laser Lasit	
	3.3.1 Lasit Fly	45
	3.3.2 Lasit FlyAir	48
3.4	Sistemi Laser IPG	
	3.4.1 Fly Fiber 30	50
	3.4.2 DLR-200	52
3.5	Strumenti di analisi e misura	53

CAPITOLO 4: Applicazioni Studiate

4.1	Introduzione	56
4.2	Materiali trattati	
4.2.1	Materiali organici	57
4.2.2	Materiali ceramici	61
4.2.3	Materiali polimerici	67
4.2.4	Materiali compositi	74
4.3	Conclusioni	77

CAPITOLO 5: Caratterizzazione di un processo di taglio laser: CFRP

5.1	Introduzione	78
5.2	Procedura sperimentale	80
5.3	Taglio con aria compressa: analisi dei risultati	84
5.4	Taglio con azoto: analisi dei risultati	90
5.5	Confronto tra l'estensione della HAZ	98

CONCLUSIONI	101
--------------------	------------

BIBLIOGRAFIA	104
---------------------	------------

INTRODUZIONE

Il laser appartiene ormai all'insieme delle tecnologie più importanti e significative, destinata ad una continua evoluzione, data la sua enorme versatilità ed applicabilità a qualsiasi settore, nonostante fosse stato definito come *una soluzione alla ricerca di un problema concreto* quando, nel 1960, Theodore Maiman creò il primo laser a rubino.

Nel passato le sorgenti laser sono state ampiamente utilizzate nella lavorazione dei metalli, quali taglio, saldatura e trattamenti termici. Solo recentemente hanno trovato nuove applicazioni in campi come la marcatura, l'ablazione selettiva e l'engraving su materiali non solo metallici, ma anche ceramici, polimerici e materiali naturali (legno, cuoio e pelle). Questo è stato possibile grazie all'introduzione di sorgenti laser caratterizzate da nuove architetture costruttive ed in grado di generare fasci a lunghezze d'onda differenti.

Infatti, l'interazione tra fascio laser e materiale è fortemente influenzata dal coefficiente di assorbimento che dipenderà, a sua volta, dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente. Inoltre, le sorgenti laser impulsive, nonostante le ridotte potenze medie permettono di avere potenze impulsive estremamente elevate e di ridurre decisamente il carico termico indotto sul materiale rispetto ad una sorgente operante in regime continuo.

Quest'ultimo aspetto è fondamentale là dove si voglia procedere alla lavorazione di materiali estremamente conduttivi e/o dotati di temperature di fusione particolarmente elevate.

L'attività svolta nei 3 anni è stata pianificata con l'intento di dimostrare le potenzialità della tecnologia laser in diverse applicazioni industriali, concentrando principalmente l'attenzione sul taglio.

L'intero lavoro è stato svolto presso il CIRTIBS (*Centro Interuniversitario di Ricerca sulle Tecnologie Innovative per i Beni Strumentali*) nella sede di Napoli, presso cui sono disponibili ben 8 sorgenti laser differenti, così distribuite:

Il lavoro riportato nel seguito è stato sviluppato in tre fasi.

La prima ha riguardato un'attenta valutazione della tecnologia laser ed in particolare nelle applicazioni di taglio (*capitolo 1* e *capitolo 2*) evidenziando vantaggi e svantaggi rispetto alle altre tecnologie, convenzionali e non, usate per le stesse applicazioni.

La seconda fase ha previsto lo studio delle caratteristiche tecniche e delle potenzialità offerte dalle sorgenti impiegate, con particolare attenzione ai software di gestione ed ai sistemi di movimentazione delle sorgenti stesse (*capitolo 3*).

La possibilità di disporre di differenti sorgenti laser ha permesso quindi di sviluppare ulteriormente modelli già presenti in letteratura oppure di concepire applicazioni del tutto innovative relativamente ad un'ampia gamma di materiali. Traendo spunto anche dalla notevole esperienza acquisita nelle lavorazioni di marcatura ed engraving, (*capitolo 4*) è stata organizzata una lunga campagna sperimentale in modo tale da caratterizzare le diverse modalità di interazione tra fascio laser e materiale, ottimizzare i parametri di processo e scegliere quale fosse la sorgente più adatta al taglio dei materiali studiati.

I materiali trattati sono stati:

- organici (legno, cuoio e pelle conciata);
- ceramici (pietre sintetiche, pietre naturali, silicio);
- polimeri (PMMA, Polietilene, Polipropilene, ABS);
- compositi (CFRP).

Il particolare interesse suscitato dai materiali compositi ma anche le diverse problematiche connesse con la lavorazione di questi particolari materiali (usura degli utensili, pull-out, delaminazione) ha spinto a concentrare l'attenzione su questi ultimi.

L'impiego di questi materiali è ben consolidato per fini strutturali e non solo, in settori come quello aerospaziale, navale e automotive anche se oggi giorno sta nascendo nel settore dell'oggettistica e dell'accessoristica un nutrito interesse per i materiali compositi, soprattutto con rinforzo in fibra di carbonio.

Le tecnologie comunemente usate per lavorare questi materiali difficilmente possono soddisfare le dimensioni e/o il grado di precisione richiesto in questi nuovi settori, diventando improponibili soprattutto là dove sia necessario realizzare geometrie particolarmente complesse.

Il taglio laser, poiché è un processo che non prevede contatto tra pezzo ed utensile, non causa stress meccanico né usura dell'utensile. Tuttavia essendo un processo di tipo

termico, indurrà sul materiale un degrado tanto più elevato quanto più differenti sono le proprietà tra fibra e matrice. Inoltre, le proprietà intrinseche del materiale (non omogeneità, anisotropia, proprietà chimico-fisiche tra matrice e fibre molto diverse) rendono estremamente complicata una previsione accurata della modalità di interazione tra i materiali ed il laser.

Nel *capitolo 5* verranno quindi illustrati i risultati ottenuti nella caratterizzazione del processo di taglio di laminati CFRP dello spessore di 1.2 mm, tramite una sorgente laser Nd:YAG operante in regime impulsato (mod. STARCUT 150 della Rofin), con durate nell'ordine dei milli-secondi.

Variando tutti i parametri energetici tipici di una lavorazione laser (potenza media, durata dell'impulso, frequenza di ripetizione, energia impulsiva, velocità di processo e gas d'assistenza) è stato possibile individuare l'effetto dei suddetti sulla qualità del taglio, sia in termini geometrici che in termini di difetti riscontrati.

Particolare attenzione è stata dedicata alla Zona Termicamente Alterata (*Heat Affected Zone*), difetto ritenuto critico per questo tipo di materiale e per questo tipo di lavorazione. Tra tutti sono stati individuati quei parametri su cui agire per minimizzarne l'estensione, arrivando a fissare la durata dell'impulso, il fattore di ricopertura e l'*on-time* come i parametri più significativi.

CAPITOLO 1

I laser

1.1 Introduzione

Laser è l'acronimo inglese di *Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*, ovvero Amplificazione di Luce tramite Emissione Stimolata di Radiazione. È un dispositivo in grado di generare un fascio di radiazioni elettromagnetiche ad elevata potenza con tre particolari caratteristiche:

- *unica frequenza (monocromaticità);*
- *unica fase (coerenza);*
- *divergenza limitata.*

Il vasto impiego di tale tecnologia è proprio dovuto al fatto che in ciascun utilizzo viene sfruttata una o più delle tre caratteristiche principali elencate. Per esempio la monocromaticità e la coerenza rendono il laser un ottimo strumento di misura di distanze, spostamenti e velocità anche piccolissimi; sempre la monocromaticità lo rende adatto a trasportare informazioni nelle fibre ottiche e per distanze lunghissime. Nelle lavorazioni industriali, le radiazioni elettromagnetiche che costituiscono il fascio laser trasmettono un'elevata energia al pezzo da lavorare inducendone un aumento di temperatura tale da permetterne la locale fusione e vaporizzazione. Quindi l'elevata potenza fornita dal laser, unita ad un'elevata velocità di esecuzione e qualità del risultato, ne permettono l'impiego in molti tipi di lavorazione: dal taglio alla saldatura, dai trattamenti termici superficiali alla marcatura, dalla microforatura al riporto. Ognuna di tali applicazioni richiede un fascio con caratteristiche particolari e specifiche.

Una tipica stazione di lavorazione laser è generalmente costituita dai seguenti elementi:

- la sorgente laser;
- il sistema di trasporto del fascio;
- il sistema di focalizzazione del fascio;
- il sistema di movimentazione del fascio;

1.2 Generazione e caratteristiche del fascio laser

Come si è già anticipato, il laser è una radiazione elettromagnetica. Secondo la teoria ondulatoria della radiazione, essa può esser vista come un'onda caratterizzata da un campo elettrico ed uno magnetico che si propagano nel tempo e nello spazio con legge sinusoidale, trasportando un'energia ripartita in modo uguale tra i due campi (fig. 1).

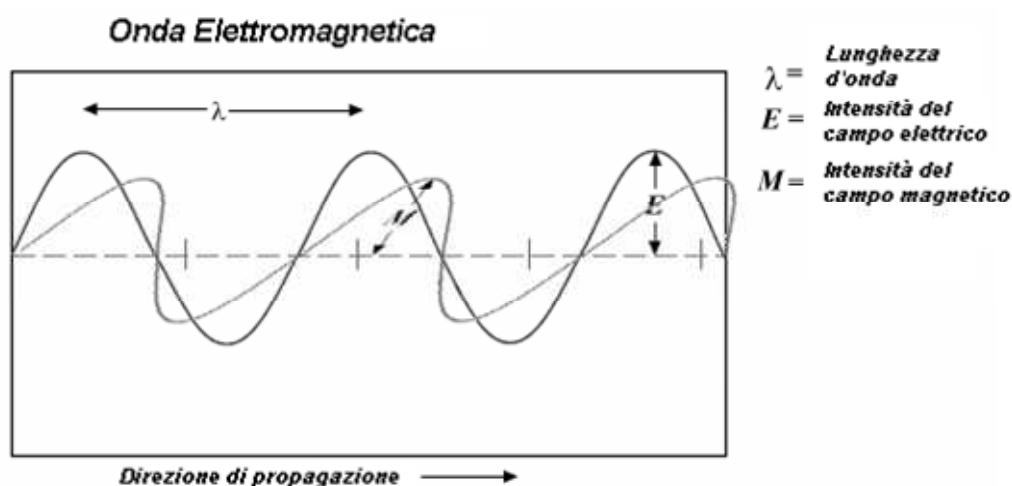


Figura 1: Una generica onda elettromagnetica

La velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche v è pari al prodotto

$$f = 1/T$$

dove f è la frequenza della radiazione legata al periodo T dell'onda dalla relazione e λ è la lunghezza d'onda.

La velocità di propagazione di tale radiazione è indipendente dalla sua lunghezza d'onda ed è pari alla velocità della luce se la propagazione avviene nel vuoto.

$$v_0 = c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Le radiazioni elettromagnetiche vengono denominate in modo differente a seconda della lunghezza d'onda ovvero della frequenza. Nella fig. 2 vengono rappresentati lo spettro e le varie denominazioni delle radiazioni elettromagnetiche.

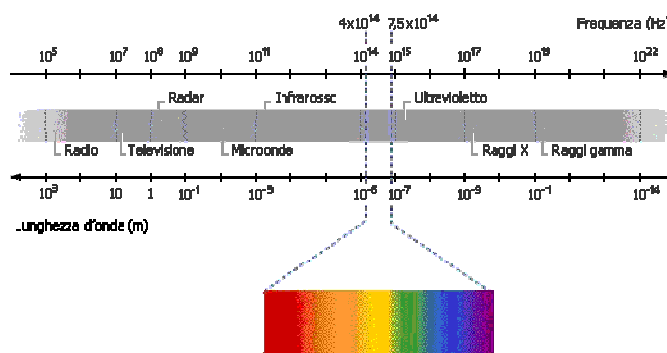


Figura 2: Spettro delle radiazioni elettromagnetiche

In accordo con la teoria corpuscolare della radiazione, il laser può esser visto anche come un flusso di fotoni con intensità crescente al crescere dell'ampiezza dell'onda. L'energia e associata ad un fotone di frequenza f è pari a:

$$e = hf \quad , \quad h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

dove h è la costante di Planck.

Un fascio laser è generato da un dispositivo sorgente. Per comprendere come una sorgente laser generi il fascio bisogna introdurre tre concetti: *l'emissione stimolata*, *l'inversione di popolazione* e *la risonanza ottica*, schematizzati graficamente in fig. 3.

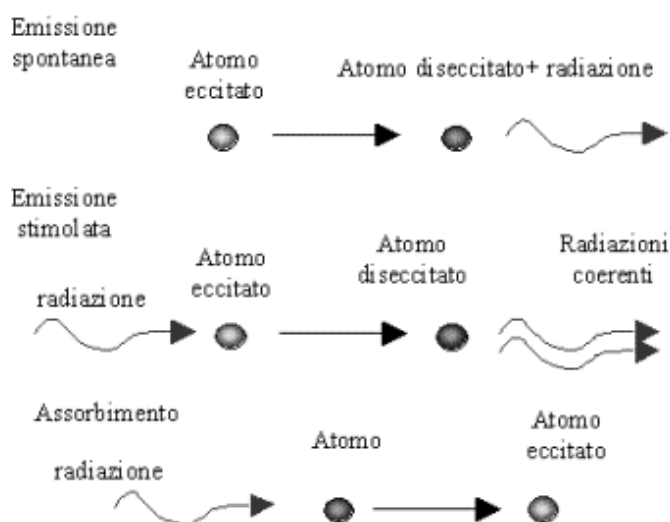


Figura 3: Fenomeni di interazione atomo-fotone

Si consideri un atomo al livello energetico fondamentale E_1 sul quale impatta un fotone con un'aliquota di energia data dalla relazione precedente. Si ha *assorbimento* del fotone da parte dell'atomo quando il fotone, a seguito della collisione, cede la sua energia all'atomo stesso, permettendo a quest'ultimo di traslare verso un livello energetico superiore E_2 (compatibile con la struttura dell'atomo). Affinché il fotone di frequenza f venga assorbito dall'atomo deve risultare che:

$$E_2 - E_1 = \Delta E = h \cdot f$$

dove E_2 è il livello energetico finale.

Dopo un determinato intervallo di tempo, l'atomo ritorna al livello energetico fondamentale e si ha l'*emissione spontanea* del fotone.

Se invece l'atomo si trova già al livello energetico E_2 e viene raggiunto da un fotone con la stessa frequenza f , non si avrà assorbimento ma un'*emissione stimolata*, ovvero verranno rilasciati due fotoni entrambi di energia $h \cdot f$, e l'atomo tornerà al livello energetico E_1 .

Oltre ad avere la stessa energia i due fotoni saranno caratterizzati dalla stessa direzione e fase, che tra l'altro sono uguali a quelle del fotone incidente.

Se n_1 rappresenta il numero di atomi (di un sistema qualunque) che si trovano allo stato energetico fondamentale E_1 e n_2 rappresenta il numero di atomi (dello stesso sistema) che si trovano allo stato energetico E_2 , quando $n_1 > n_2$, il fenomeno più probabile è l'assorbimento, mentre quando $n_2 > n_1$ il fenomeno più probabile è l'emissione stimolata.

Per generare un fascio laser deve verificarsi la condizione secondo cui $n_2 > n_1$, cioè si deve agire sul sistema stesso imponendo un'*inversione di popolazione*.

Per far avvenire un'inversione di popolazione è necessario quindi fornire energia al materiale in modo da far migrare una grande quantità di atomi dal livello energetico E_1 al livello energetico E_2 . Questa operazione è detta di *pompaggio energetico* e deve perdurare per tutto il tempo in cui viene generato il fascio laser.

Un materiale in cui si ha $n_2 > n_1$, è detto *mezzo attivo*. In questa condizione è molto più probabile che il mezzo si comporti come *amplificatore di fotoni* che come uno *smorzatore*. Tuttavia, per rendere efficace il pompaggio è necessario che l'atomo, una volta portato al livello energetico E_2 , non decada immediatamente, ma permanga al livello eccitato per un tempo relativamente elevato, in modo tale che aumenti la

probabilità che il suo decadimento sia associato all'emissione stimolata piuttosto che all'emissione spontanea. Per tale motivo l'elemento costituente il mezzo attivo viene scelto in modo tale che sia *metastabile*, sia cioè in grado di permanere ad un livello energetico superiore sufficientemente lungo

In realtà, l'inversione di popolazione e l'emissione stimolata non sono sufficienti da soli a garantire la generazione di un fascio laser. Occorre amplificare la radiazione.

A tale scopo il mezzo attivo è posizionato tra due specchi affacciati. Tra questi due specchi i fotoni vengono riflessi in entrambi i sensi attraversando più volte ed in continuazione il mezzo attivo che diventerà così un *amplificatore di fotoni*.

La camera in cui avviene questa amplificazione è detta *cavità risonante*. Tuttavia, affinché il sistema funzioni è necessario che la distanza L tra i due specchi contrapposti sia esattamente un multiplo intero di una semi-lunghezza dell'onda generata per emissione stimolata.

Affinché il raggio, così generato, possa fuoriuscire dalla cavità uno dei due specchi deve essere semi-riflettente. In questo modo, solo quei raggi che vengono riflessi in modo perfettamente parallelo lasciano la cavità ottica sotto forma di luce coerente.

L'intero processo di generazione di un fascio laser è schematizzato in fig. 4 e vengono rappresentate le varie fasi della genesi del fascio laser.

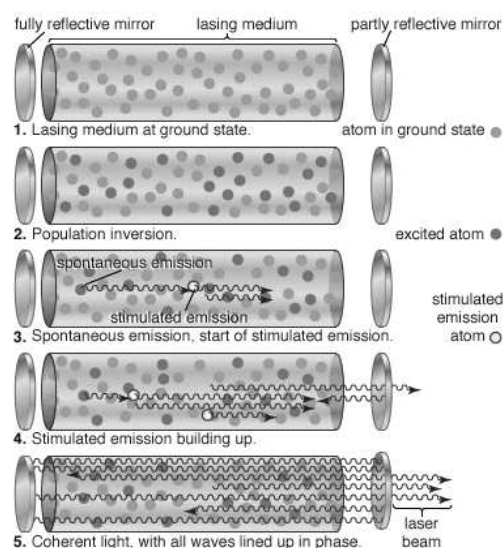


Figura 4: Genesi del fascio laser nella cavità risonante

Dal mezzo attivo dipenderà la lunghezza d'onda della radiazione generata.

Il pompaggio energetico può avvenire secondo due diverse modalità:

- Ottico.
- Elettronico.

Il pompaggio ottico può avvenire attraverso *lampade* o *diodi laser*. Vengono utilizzate lampade al tungsteno, allo *xeno* ed al *kriptone*. Queste lampade non sono monocromatiche né monodirezionali e per tale ragione la loro resa è bassa. L'utilizzo dei diodi laser per il pompaggio energetico si è diffuso negli ultimi anni.

Solitamente il diodo viene posizionato in maniera tale da illuminare una delle due estremità della barretta di mezzo attivo ed il flusso di fotoni di eccitazione è quindi diretto assialmente e non trasversalmente come accade nelle sorgenti a lampade. Grazie alla caratteristica di monocromaticità del diodo laser rispetto alle lampade tradizionali si ottiene un aumento della efficienza globale della sorgente rispetto alla tradizionale soluzione con lampade.

Il pompaggio elettronico consiste nel posizionare il mezzo attivo tra le armature di un condensatore, che caricate con una differenza di potenziale mettono in movimento gli elettroni all'interno del mezzo attivo, i quali attraverso gli urti danno luogo all'inversione di popolazione.

Come già accennato in precedenza, un fascio laser è caratterizzato da:

- *Monocromaticità*. Un fascio laser concentra la sua radiazione elettromagnetica su un'unica lunghezza d'onda e frequenza (dipendente dal mezzo attivo), al contrario di quanto faccia un sorgente luminosa convenzionale, la cui radiazione elettromagnetica è distribuita su uno spettro più ampio.
- *Coerenza*. Le onde elettromagnetiche che costituiscono il fascio laser hanno la stessa fase.
- *Bassa divergenza ed elevata focalizzabilità*.

Inoltre:

- *Potenza P* (espressa in W), definita come energia *Q* trasportata dal fascio riferita all'unità di tempo.
- *Fluenza F* o *densità di energia* [J/m^2] del fascio il rapporto:

$$F = Q/S$$

dove S è la sezione del fascio laser.

- Irradianza I o densità di potenza [W/m^2] del fascio il rapporto:

$$I = P/S$$

La densità di potenza non è costante nella sezione del fascio laser, ma ha una distribuzione spaziale dovuta alle dimensioni ed alla geometria della cavità risonante. Variando la geometria degli specchi è possibile concentrare sull'asse o distribuire sulla sezione la densità di potenza. La distribuzione più importante è sicuramente quella *gaussiana* in cui la maggior parte della densità di potenza è concentrata proprio sull'asse del fascio.

Un modo per caratterizzare la distribuzione spaziale della densità di potenza è il *Modo Elettromagnetico Trasversale* (*Transverse Electromagnetic Mode*, *TEM*). La notazione prevede l'utilizzo dell'indicatore TEM_{mn} dove m e n rappresentano il numero dei minimi di densità di potenza presenti nella sezione normale all'asse del fascio nelle due direzioni ortogonali x e y rispettivamente.

Ad esempio, una sorgente con TEM_{00} indica un fascio con un profilo spaziale senza minimi e con un unico massimo, centrato nell'origine degli assi, e corrisponde alla distribuzione gaussiana. La modalità TEM_{01} indica un fascio con un minimo in direzione y e nessuno in x , mentre la modalità TEM_{11} indica un fascio con un minimo in ogni direzione x e y , per un totale di quattro massimi di potenza. La modalità TEM_{mn}^* indica la sovrapposizione di due modi identici, ruotati tra loro di 90 gradi. La distribuzione TEM_{01}^* , ad esempio, è una distribuzione circolare con un minimo sull'asse (denominata anche a *ciambella*). In figura 5 si riportano alcuni modi TEM.

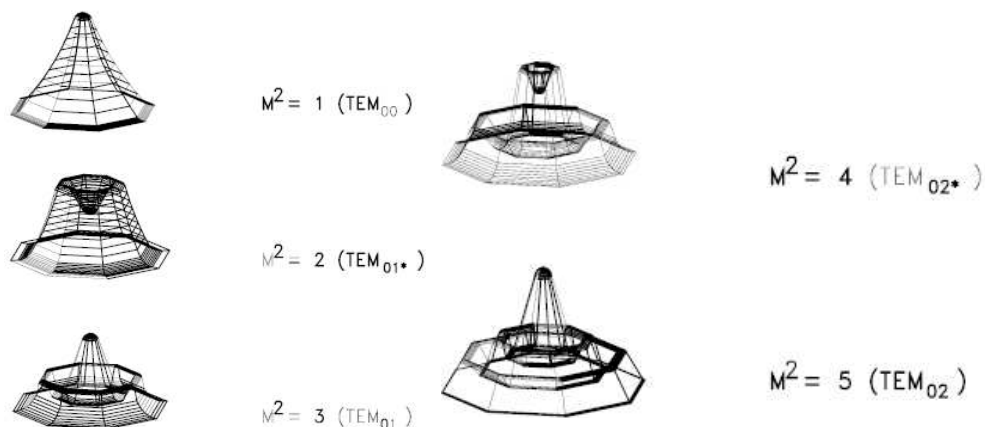


Figura 5: Esempi di alcuni modi TEM e relativa distribuzione di potenza [2].

Una sorgente laser può generare un fascio che presenta più modi TEM_{mn} sovrapposti. In questo caso si parla di un laser *multimodo*, distinguendolo così da un laser a *modo singolo*.

Uno dei casi più frequenti è la somma del modo TEM_{00} con il modo TEM_{01}^* , che conferisce al fascio una distribuzione prossima alla distribuzione omogenea. La distribuzione spaziale della densità di potenza può essere modificata andando a “spillare” una parte del fascio laser ottenendo così spot più piccoli anche se a discapito della potenza associata al fascio stesso.

Ci sono due modalità in cui operano le sorgenti laser (fig. 6) :

- *regime continuo* (Continuos Wave, CW);
- *regime impulsato* (Pulsed Wave, PW).

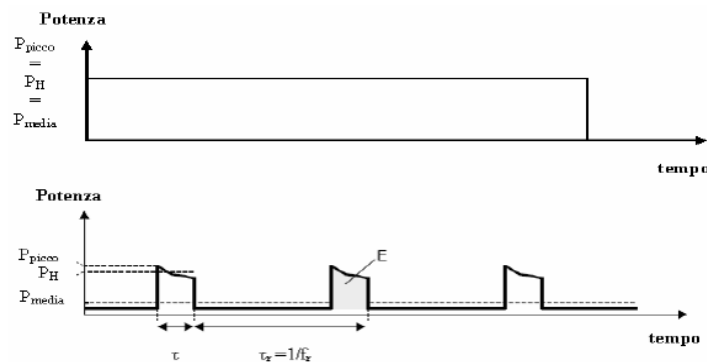


Figura 6: Regime continuo e regime impulsato

Nel caso specifico di regime impulsato, bisognerà quindi definire:

- τ [ms] = *durata dell'impulso*;
- f [Hz] = *frequenza degli impulsi*;
- E [J] = *energia del singolo impulso*;
- $P = E \cdot f$ [W] = *potenza media degli impulsi*;
- P_{picco} [W] = $\max P(t)$ con $0 < t < \tau$.

Caratteristica peculiare di un funzionamento in regime impulsato è che, a parità di potenza media generata dalla sorgente, in regime impulsato si ottengono potenze di picco molto elevate. Il regime impulsato in genere è in grado di ridurre lo stress termico indotto durante la lavorazione. Proprio per questo motivo è preferibile quando si ha la necessità di contenere il danneggiamento termico del materiale.

Può essere ottenuto nei seguenti modi:

- *Eccitazione pulsata del mezzo attivo (free-running)*: è il metodo più semplice per ottenere un'emissione laser pulsata; ad esempio nei laser che vengono eccitati tramite lampade si ottiene un'eccitazione pulsata del mezzo attivo utilizzando lampade flash. La durata degli impulsi può essere al minimo nell'ordine dei millisecondi.
- *Q-switch*: con questo dispositivo i tempi di durata dell'impulso si abbreviano notevolmente, fino ad arrivare a durate dell'ordine dei nanosecondi). Il Q-switch più semplice è quello meccanico, creato facendo ruotare uno dei due specchi della cavità risonante intorno ad un asse normale all'asse ottico della cavità. L'emissione si avrà solo quando i due specchi sono affacciati sulla cavità, mentre nel restante tempo l'energia si accumula come inversione di popolazione.
- *Mode locking*: In questa modalità di funzionamento è possibile ottenere impulsi di durata estremamente breve, nell'ordine dei femtosecondi. Attualmente le applicazioni industriali che utilizzano sorgenti che operano in mode locking sono del tutto trascurabili.

Per quanto riguarda invece la geometria di un fascio laser può essere approssimata ad una geometria convergente-divergente, come schematizzato in figura 7.

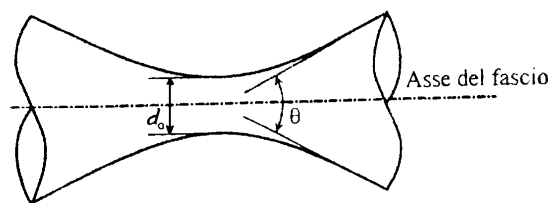


Figura 7: Geometria di un fascio laser

Il punto di minimo diametro (d_0) viene detto *fuoco*, mentre la zona a cavallo di esso viene detta *collo*. In una zona lontana dal collo, il fascio ha geometria conica con generatrici rettilinee e con angolo al vertice pari a θ .

Questo angolo è chiamato *angolo di divergenza* ed il suo valore è legato a fattori costruttivi della sorgente ed in generale è molto piccolo, nell'ordine dei milliradiani.

La divergenza del fascio in una zona lontana dalla sorgente è quindi pari a:

$$\theta = k \frac{\lambda}{d_0}$$

dove d_0 è il diametro minimo del fascio e generalmente cade in un punto interno alla sorgente, mentre k dipende esclusivamente dalla distribuzione di densità della potenza del fascio, cioè dal suo profilo spaziale. Ad esempio, per un fascio gaussiano si ha:

$$k_g = \frac{4}{\pi} = 1.27$$

Il valore più piccolo che si può osservare per la divergenza di un fascio laser in uscita dalla sorgente è dato da:

$$\theta_g = \frac{4\lambda}{\pi d_0}$$

In tutti gli altri casi è $\theta > \theta_g$.

Si definisce *fattore di propagazione del fascio* K il rapporto:

$$K = \frac{\theta_g}{\theta} = \frac{k_g}{k} = \frac{4}{\pi} \frac{1}{k}$$

Ovviamente $0 < K \leq 1$ e più il valore di K è vicino all'unità, più la distribuzione di irradianza è vicina alla distribuzione gaussiana.

È possibile utilizzare, in sostituzione al fattore K , il *fattore* M^2 definito come l'inverso di K . Al tendere di M^2 all'unità si tende alla distribuzione gaussiana. Questo ultimo fattore è fortemente correlato al fattore TEM. Aumentando l'ordine dei modi elettromagnetici trasversi il fattore M^2 cresce. Questo influenza direttamente le dimensioni dello spot di focalizzazione del fascio e quindi i risultati delle lavorazioni.

In definitiva, all'interno di un sistema laser è possibile riconoscere tre distinte trasformazioni di energia ad ognuna delle quali è possibile associare un'efficienza di trasformazione (figura 8).

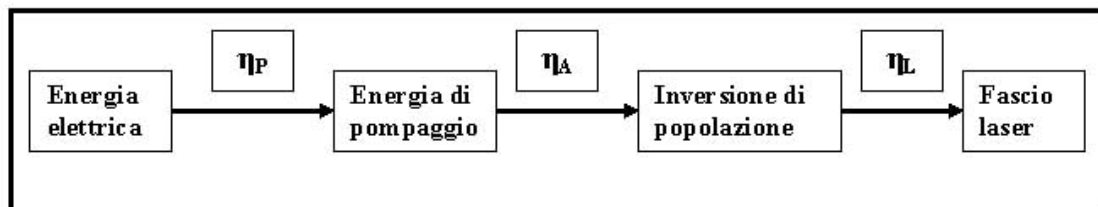


Figura 8: Trasformazioni energetiche di una sorgente laser [1].

L'efficienza globale di una sorgente laser sarà quindi:

$$\eta = \eta_p \cdot \eta_a \cdot \eta_l = \frac{\text{energia del fascio}}{\text{energia assorbita dalla rete elettrica}}$$

1.3 Sistemi di trasporto e focalizzazione

Una volta generato, il fascio deve essere trasportato dalla sorgente fino alla zona in cui avviene la lavorazione, garantendo i gradi di libertà necessari al movimento relativo tra fascio e pezzo.

I sistemi di trasporto utilizzabili sono generalmente due:

- *Catena ottica.* Il fascio viene trasportato mediante specchi, a volte mobili. In genere sono realizzati in rame o silicio e possono essere ricoperti da materiale altamente riflettente e con spiccate proprietà anti-ossidante. A volte, per favorire lo smaltimento del calore prodotto, gli specchi possono essere raffreddati.
- *Fibra ottica* costituita da un'anima a sezione circolare in materiale trasparente al fascio laser contenuta in una guaina esterna che riflette la radiazione. Il funzionamento di questa tecnologia si basa sul fenomeno della *totale riflessione interna* della luce. Le principali problematiche di cui tener conto sono il diverso comportamento delle fibre ottiche al variare della lunghezza d'onda. Ad esempio, l'eccessivo assorbimento rende questo sistema di trasporto inefficace per lunghezze d'onda pari a 10,6 μm . Inoltre, il fascio laser, quando fuoriesce non conserva memoria della distribuzione spaziale della densità di potenza che aveva all'ingresso.

Una volta trasportato nella zona di lavoro, il fascio laser deve essere focalizzato nello spot desiderato, sia per aumentare la densità di potenza sia per avere la precisione di lavorazione richiesta.

Se il fascio laser viene trasportato mediante una catena ottica la focalizzazione del fascio laser può avvenire con due modalità differenti: per *trasmissione*, tramite una lente, o per *riflessione*, tramite uno specchio concavo.

Le lenti sono generalmente piane-convexe oppure a menisco, mentre gli specchi sono parabolici o sferici.

La prima soluzione è tipica dei laser che sfruttano come materiale attivo Nd:YAG (stato solido) oppure CO₂ (stato gassoso) di potenza relativamente bassa (indicativamente fino

a 4 kW). Per potenze superiori, la lente subisce un eccessivo aumento di temperatura che porta al danneggiamento della lente stessa. La soluzione a specchi è invece obbligatoria per le sorgenti laser CO₂, poiché questi non attraversano il vetro.

La focalizzazione di un fascio trasportato mediante *fibra ottica* avviene con modalità differente da quanto descritto fino ad ora. All'uscita della fibra ottica il fascio diverge e deve essere focalizzato attraverso una coppia di lenti: una di *ricollimazione* ed una di *focalizzazione* (figura 9).

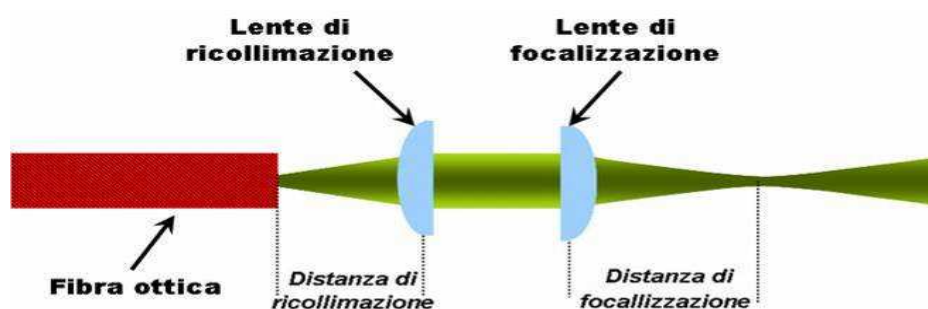


Figura 9: Focalizzazione del fascio trasportato da una fibra ottica.

Dalla *distanza di focalizzazione* f_f e dalla *distanza di ricollimazione* f_r (oltre che dalla lunghezza d'onda λ) dipenderà la dimensione minima dello *spot focale*, ottenibile in base alla seguente relazione:

$$d_0 = d_{f0} \cdot \frac{f_f}{f_r}$$

In alcune tipologie di lavorazione (ad esempio, trattamenti termici mediante laser), si preferisce utilizzare dei fasci non focalizzati e le dimensioni dello spot dipendono solo dalle caratteristiche della lente di ricollimazione.

1.4 Classificazione dei laser

La classificazione più significativa che si fa dei laser è quella che tiene conto dello stato fisico del materiale attivo. In particolare:

- *Laser a stato solido*. I materiali più comuni impiegati nei laser a stato solido sono barrette di cristallo di rubino o di vetro drogati con neodimio (Nd:YAG). Le estremità delle barrette sono costituite da due superfici parallele ricoperte con uno strato sottile di materiale metallico, altamente riflettente. Il pompaggio

energetico può avvenire mediante lampade flash o mediante diodi. La lunghezza d'onda fondamentale di un laser Nd:YAG è di 1,064 μm . Negli ultimi anni si sono diffusi largamente, date le prestazioni superiori, laser ad Y:YAG la cui lunghezza d'emissione è di 1.060 μm . Le sorgenti laser a stato solido maggiormente usate sono due:

- *A barrette*: è la più diffusa ed è costituita da una o più barrette di Nd:YAG di sezione circolare di circa una decina di millimetri di diametro e una centinaia di lunghezza. Queste barrette sono poste all'interno di una camera che generalmente ha sezione a doppia ellissi in cui il fuoco comune alle due ellissi è occupato dalla barretta, mentre le lampade per il pompaggio sono posizionate nei due fuochi restanti. All'interno della camera fluisce il liquido di raffreddamento (generalmente acqua) che consente di smaltire il calore generato. Montando più barrette in serie (dotandole delle rispettive lampade di pompaggio) è possibile aumentare la potenza della sorgente, modulandola in relazione alle necessità dettate dall'applicazione.
- *a capillari*: in queste sorgenti il mezzo attivo è costituito da una "fetta" di Nd:YAG. Le lampade sono poste in modo tale da illuminare la "fetta" di materiale attivo attraverso le superfici più ampie, in modo da aumentare l'efficienza dell'inversione di popolazione. Il fascio emesso viene corretto otticamente all'uscita della sorgente per migliorarne la qualità ottica e conferirgli una sezione circolare.

I laser a Nd:YAG soffrono di problemi di surriscaldamento del mezzo attivo che tende quindi a deformarsi e a compromettere perciò la qualità del fascio generato. Per evitare questi problemi, le sorgenti di ultima generazione prevedono di inserire il materiale attivo all'interno della stessa fibra che servirà poi a trasportare il fascio (*VEDI laser in fibra*).

- *Laser allo stato gassoso*. Il materiale usato può essere un gas puro, una miscela di gas o di vapori metallici e solitamente è contenuto in un tubo cilindrico di vetro o di quarzo. Due specchi sono posti alle estremità del tubo per formare la cavità risonante. I laser a gas vengono pompati mediante luce ultravioletta, fasci di elettroni, corrente elettrica o reazioni chimiche. Tale categoria riguarda i laser a CO_2 , i laser ad Azoto (N_2) e quelli a Neodimio-Elio (Ne-He).

La lunghezza d'onda di emissione dei laser a CO₂ è pari a $\lambda=10,6 \mu\text{m}$; questo non consente l'impiego di fibre ottiche per il trasporto e, per la focalizzazione, non si possono utilizzare le lenti. In questo caso si utilizzano specchi metallici piani per la trasmissione e parabolici o ellittici per la focalizzazione. Questi laser possono raggiungere potenze elevate grazie all'impiego di ottiche in metallo, che possono essere facilmente raffreddate con ricircolo d'acqua. L'efficienza di tali laser è maggiore rispetto ai laser Nd:YAG. Il diametro dello spot di focalizzazione può raggiungere valori di $250 \mu\text{m}$.

Esistono quattro tipi di sorgenti CO₂ in commercio:

- *Sorgenti sigillate*: il gas è immesso nella cavità risonante all'atto di costruzione. Hanno un funzionamento di circa 5.000 ore, dopo di che la sostituzione del gas richiede una nuova sigillatura. Sono le sorgenti più piccole e compatte, ma anche quelle meno potenti.
- *Flusso assiale*: Sono costituite da un tubo di vetro in cui viene immessa la miscela di gas da un'estremità e estratta dall'altra. Una volta estratta, la miscela viene raffreddata e di nuovo pompata nella sorgente: nella cavità viene quindi continuamente rinnovata con miscela a bassa temperatura, consentendo quindi di estrarre una maggiore potenza rispetto alle sorgenti sigillate.
- *Flusso trasversale*: il gas fluisce circolarmente all'interno di un tamburo sotto l'azione di una turbina, attraversando la cavità. Il pompaggio del mezzo attivo avviene attraverso l'eccitazione in radiofrequenza del gas con due elettrodi ai lati del flusso. A valle della cavità il gas passa attraverso uno scambiatore di calore che provvede a raffreddarlo. Le potenze massime ottenibili sono estremamente elevate (decine di kW) ma la qualità del fascio è molto bassa.
- *Capillari*: Sorgenti costituite da una cavità di geometria parallelepipedica di basso spessore. Le due facce di maggiori dimensioni della camera contenente il gas sono in rame e costituiscono i due elettrodi tra cui avviene la scarica, ma consentono anche di raffreddare il gas per convezione naturale. La potenza massima ricavabile è di circa 6 kW e la qualità del fascio viene migliorata con dispositivi ottici all'uscita della cavità.

- *Laser a semiconduttori.* A questa categoria appartengono i laser a diodi. Questa tipologia di sorgenti (lunghezza d'emissione compresa tra 940 nm e 975nm) trovano applicazione molto ampie che vanno dai sistemi di pompaggio sino alla realizzazione di sorgenti di potenza. Sono basati su una giunzione tra semiconduttori dotati di diversa conducibilità elettrica. La cavità risonante è confinata alla zona di giunzione per mezzo di due pareti riflettenti. Il semiconduttore più usato e più efficiente è l'arseniuro di gallio. Questi laser sono pompati mediante l'applicazione diretta di corrente elettrica alla giunzione e possono operare in modalità a onda continua con rendimento superiore al 50%. Modulando l'alimentazione, possono operare anche in regime impulsato.
- *Laser in fibra.* La continua necessità di potenze sempre più elevate e frequenze di impulsi laser sempre più alte ha portato allo sviluppo di laser che utilizzano come mezzo attivo il *core* di una fibra ottica, opportunamente drogata, ospitato all'interno della fibra stessa (fig. 10). L'energia di pompaggio, fornita da una serie di diodi, è indirizzata all'interno del rivestimento compreso tra il core vero e proprio e la guaina riflettente esterna che avvolge la fibra. In questo modo la radiazione eccitante, subendo successive riflessioni, attraversa più volte il mezzo attivo, dando origine al fascio laser. In questa particolare categoria di sorgenti, gli specchi della cavità risonante vengono sostituiti da due *reticoli di Bragg* che, opportunamente incisi, delimitano la porzione di fibra attiva.

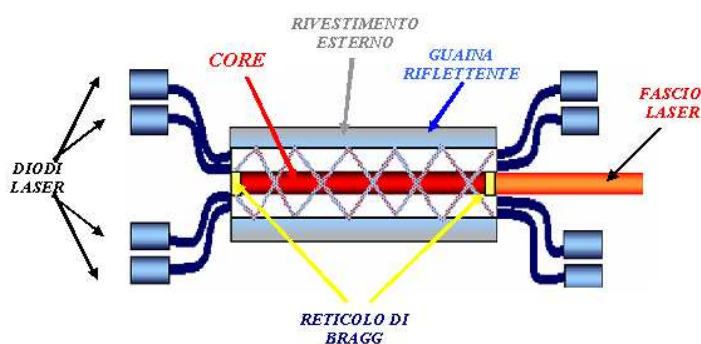


Figura 10: Schema di funzionamento di un laser a fibra.

I vantaggi di questo tipo di laser sono evidenti sia in termini di qualità del fascio laser generato sia in termini di rendimenti che, normalmente sono superiori alle sorgenti tradizionali. Si possono ottenere spot di pochi micrometri e frequenze di

impulso nell'ordine dei kHz con durate dell'impulso di nanosecondi. Il regime impulsato è ottenuto tramite Q-switch o Mode Locked.

- *Laser a stato liquido.* Non hanno grande interesse dal punto di vista industriale ma trovano larga diffusione in quello medico. Il materiale attivo è costituito generalmente da un colorante inorganico, chiuso in un recipiente in vetro. Sono pompati con lampade flash per operare nella modalità a impulsi oppure con un laser a gas ausiliare per operare nella modalità a onda continua. La frequenza caratteristica di questi laser può essere regolata utilizzando un prisma posto all'interno della cavità.

1.5 Applicazioni industriali del laser

Il taglio è la più diffusa applicazione della tecnologia laser in campo industriale, perché in grado di realizzare lembi di ottima qualità con elevata velocità di processo e buona ripetibilità.

Il taglio è un processo termico e quindi il volume di fuso rimosso durante la lavorazione è legato all'energia fornita dal fascio laser. Nel taglio laser è importante ridurre il più possibile l'ampiezza del solco generato: un solco stretto permette di tagliare spessori maggiori ad una velocità di avanzamento elevata aumentando l'efficacia e l'efficienza del processo. Per il taglio risultano adatti i fasci con spot focale molto piccolo e con una distribuzione di potenza gaussiana, perché risulta più semplice la focalizzazione e si hanno elevati valori di irradianza sull'asse del fascio.

Generalmente si scelgono le sorgenti CO₂ e Nd:YAG, mentre i diodi laser non vengono considerati in quanto il fascio generato non è focalizzabile o comunque lo è con notevoli difficoltà. Le sorgenti CO₂ in regime continuo e modalità TEM₀₀ e TEM₀₁ si usano per i materiali metallici, quelle sigillate sono adatte per i materiali non metallici. Le sorgenti Nd:YAG in regime continuo o impulsato sono adatte al taglio di piccoli spessori di metalli o per metalli particolari come l'alluminio.

Il laser è utilizzato per saldare sia metalli, anche se negli ultimi anni particolare interesse è rivolto alla saldatura laser (*bonding*). La testa per la saldatura laser (fig. 11) presenta una lente o specchio di focalizzazione del fascio per permettere di raggiungere la densità di potenza richiesta. Nella zona di lavorazione viene immesso un gas di

assistenza con lo scopo di sostituirsi all'atmosfera ed evitare l'ossidazione o nitrurazione, allontanare il plasma in quanto oscura l'azione del fascio e proteggere il sistema di focalizzazione.

Esistono due meccanismi di saldatura laser: *per conduzione* e *per profonda penetrazione*. Nella saldatura per conduzione lo spot focale riscalda il materiale fino a portarlo a fusione. Nella saldatura per profonda penetrazione, l'elevata densità di potenza causa la vaporizzazione del materiale ed induce alla formazione di un canale verticale di vapore metallico di piccolissime dimensioni ed elevata profondità detto *keyhole*. L'istantanea vaporizzazione permette di esporre sempre nuovo materiale all'azione del fascio laser e quindi di giungere in profondità.

Il materiale del keyhole passa allo stato di plasma aiutando la penetrazione della saldatura trasferendo l'energia del fascio al materiale non ancora fuso. Tale tecnica permette di ottenere un'elevata qualità del cordone di saldatura in quanto il calore non viene assorbito in superficie ma in profondità. Con il laser è possibile saldare svariate geometrie; in particolare è possibile saldare in trasparenza ove non sia possibile accedere direttamente alla zona da lavorare.

La saldatura laser è generalmente applicata agli acciai a basso tenore di carbonio con un risultato di ottima qualità, all'acciaio inossidabile, alle leghe di titanio e di nichel. Invece mal si prestano alla saldatura laser l'alluminio e le sue leghe (a causa del basso coefficiente di assorbimento e all'elevata conduttività termica), il rame (a causa dell'elevata riflettività e conduttività termica). Per quanto riguarda i materiali non metallici è possibile saldare solo i materiali che, riscaldati dal fascio, fondono. Quindi, relativamente alle sostanze polimeriche, possono essere lavorati soltanto i materiali polimerici termoplastici.

La saldatura laser presenta notevoli vantaggi rispetto alle tecnologie tradizionali:

- elevata produttività;
- ridotte dimensioni del cordone di saldatura e quindi limitate distorsioni termiche;
- limitata alterazione termica del materiale;
- assenza di cianfrino e di materiale d'apporto;
- facilità di accesso alla zona da lavorare
- elevata esteticità del cordone di saldatura che permette l'immediata verniciatura senza lavorazioni intermedie;

- elevata ripetibilità;
- elevata qualità del cordone.

Un particolare vantaggio nell'impiego della saldatura laser emerge nella fase di progetto in quanto è possibile scomporre il pezzo da realizzare in parti elementari da saldare a laser. Ciò riduce la complessità delle lavorazioni e permette di standardizzare la lavorazione grazie alla modularità dei componenti. Inoltre vi è la possibilità di personalizzare alcuni pezzi mediante innovativi miglioramenti delle caratteristiche del prodotto stesso oppure realizzando nuovi prodotti. Tutto questo è possibile in quanto la saldatura laser può essere applicata come ultima lavorazione di tutto il processo. Un esempio molto evidente è quello delle “*tailor made blanks*” (fig. 11). Sono lamiere di differenti spessori di prevalente interesse automobilistico, saldate tra loro prima che avvenga l'imbutitura per realizzare componenti a spessore differente.



Figura 11: Metodo di costruzione "tailor made blank"

Un'altra innovativa applicazione è quella della saldatura di differenti materiali come acciaio ed alluminio, generalmente noti per non essere saldabili mediante saldature convenzionali. Questo tipo di saldature è di crescente interesse nel settore cantieristico e auto motive.

La marcatura laser, rispetto alle tradizionali tecnologie di marcatura, garantisce risultati eccellenti con una migliore qualità e dei costi più contenuti. Tale tecnica rappresenta la risposta ideale per l'identificazione indelebile di qualsiasi particolare con un logo oppure un bar-code, un data matrix o un testo. Inoltre con l'utilizzo del laser si ottiene una marcatura non solo indelebile ma anche di altissima qualità e perfetta definizione,

senza assolutamente creare alcun danno o inquinamento ambientale, come invece succede con le marcature chimiche oppure ad inchiostro.

I principali vantaggi della marcatura laser sono:

- *indelebilità* - le marcature realizzate utilizzando il laser sono permanenti perchè il materiale di base viene inciso oppure brunito;
- *velocità* - si possono marcare fino a 1000 caratteri al secondo;
- *flessibilità* - qualsiasi disegno, dal semplicissimo al più complesso e ricco di particolari, viene realizzato semplicemente attraverso la pressione di un tasto, senza difficoltà alcuna per l'operatore ed è possibile marcare infinite combinazioni di logo, disegni, numeri di serie, codice a barre, data matrix, foto, testi, numeri, etc;
- *pulizia e sicurezza* – si tratta di una lavorazione non inquinante e nella quale non è richiesto nessun acido, inchiostro o solvente;
- *nessun consumo utensile* - poichè la marcatura laser è un processo senza contatto, può essere utilizzata per marcare quei particolari che potrebbero essere danneggiati da metodi meccanici quali quelli ad impatto (mediante punzone), a micropunti, a vibrazione. Inoltre la marcatura e l'incisione laser possono essere realizzate sia su superfici piane che curve, oppure su superfici dalle forme più strane e inusuali;
- *semplicità di utilizzo e bassi costi di attrezzaggio* - non sono richieste maschere, stampi o altri attrezzaggi come per gli altri metodi di marcatura tradizionali e l'impatto sul materiale è minimo, non è necessario alcun lavoro di preparazione o di rifinitura dei pezzi. Inoltre, a differenza dei processi tradizionali, il testo e/o il contenuto da marcare può essere generato con una programmazione semplicissima mediante un apposito software;
- *ampia gamma di materiali lavorabili* - la marcatura laser rappresenta la soluzione più efficiente, qualitativamente eccellente, precisa e affidabile per un'ampia gamma di prodotti quali ad esempio metalli, plastiche, gomme, pelle, carta, vetro, marmo, ceramica, metalli cromati e materiali anodizzati.

La realizzazione di una marcatura può avvenire mediante tre meccanismi fondamentali con l'obiettivo comune di generare una alterazione superficiale nella zona esposta al laser che possa essere visibile all'occhio umano:

- *Rimozione di un materiale (o incisione)*: il fascio laser ha un'irradianza tale da fondere e vaporizzare uno strato superficiale di materiale realizzando una incisione superficiale creando un effetto di notevole contrasto;
- *Trasformazione della microstruttura*: il materiale subisce un ciclo termico che genera una trasformazione della microstruttura accompagnata da una variazione dell'indice di rifrazione e quindi da una maniera differente di riflettere la luce;
- *Formazione di composti chimici*: il ciclo termico favorisce la formazione di composti chimici (ad esempio ossidi) che rendono la zona esposta al fascio visibile all'occhio umano.

Su alcuni materiali è possibile, modulando i parametri di processo, passare da un meccanismo all'altro anche se spesso dei tre meccanismi sopra elencati ne possono essere presenti anche più di uno contemporaneamente.

In fig. 12 è rappresentato un componente in acciaio inossidabile sul quale è stata effettuata una *brunitura (o annealing)* ovvero una marcatura nera e con un elevato contrasto ma senza alcuna asportazione di materiale.

Tale tipo di marcatura è adatta a tutte quelle applicazioni in cui è importante avere un contrasto netto ed una superficie intatta. Ad esempio, molti componenti aerospaziali hanno bisogno di un'identificazione permanente che però non danneggi le caratteristiche del materiale o la finitura superficiale. Quindi, solo con la marcatura laser si possono produrre immagini senza compromettere l'integrità del componente.



Figura 12: marcatura su acciaio [4].

Con il laser è possibile marcare materiali formati da più strati, come l'alluminio anodizzato ed i materiali verniciati, rimuovendo lo strato più superficiale (*ablation*) e creando un effetto di notevole contrasto.

La marcatura può anche avvenire alterando la riflettività della superficie del metallo e quindi aumentando il contrasto (*etching*). L'eventuale formazione di ossidi dovuta all'interazione dell'ossigeno con la superficie può rendere la marcatura più evidente.

Nel caso delle sostanze polimeriche, l'energia del raggio laser viene utilizzata per alterare in modo selettivo la struttura molecolare, ad esempio, dei pigmenti di colore (*reazione termochimica*) mentre la superficie del materiale rimane intatta. La qualità della lavorazione dipenderà, ovviamente, dalla tipologia del polimero, dalle pigmentazioni coloranti e dalla lunghezza della radiazione incidente.

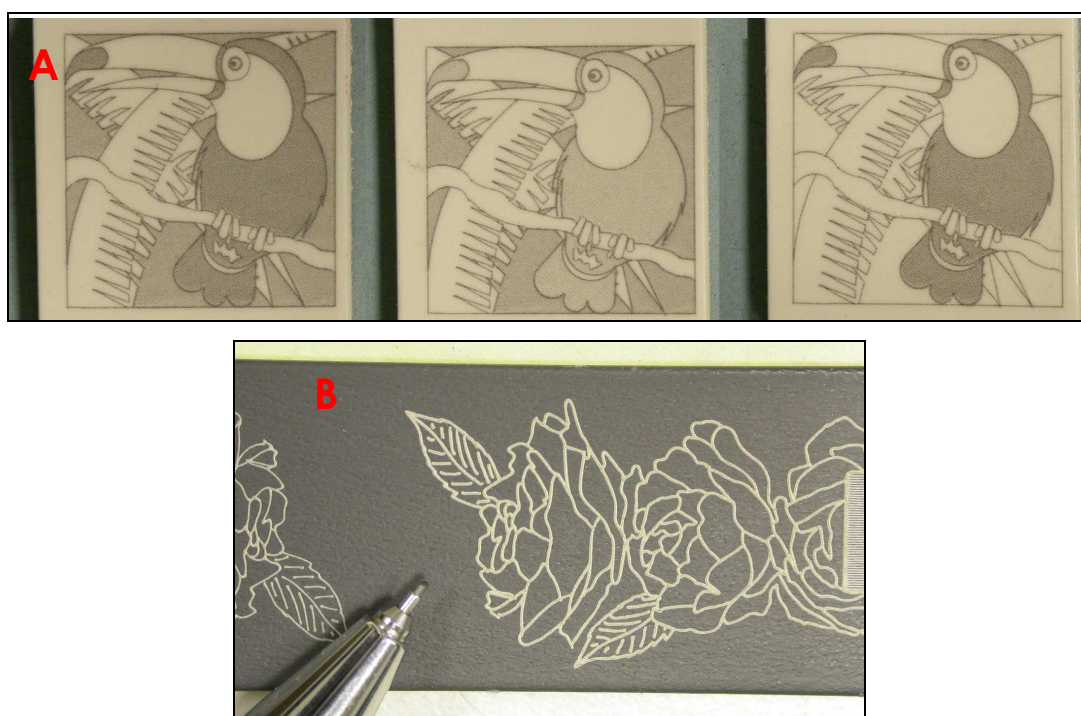


Figura 13: marcatura di sostanze polimeriche: ABS (A), PoliPropilene (B).

Impiegando densità di potenza adeguate, è possibile indurre la vaporizzazione di più strati di materiale, creando una profonda incisione o *engraving*.

Le teste usate nella marcatura laser sono di tipo galvanometrico, in cui il fascio viene deflesso da due specchi rotanti, con assi di rotazione inclinati di 90°. Il fascio così deflesso attraversa una lente che lo focalizza sul componente da marcare. Mediante un

opportuno controllo del movimento dei due specchi è possibile spostare lo spot del fascio sul piano sottostante generando quindi il disegno.

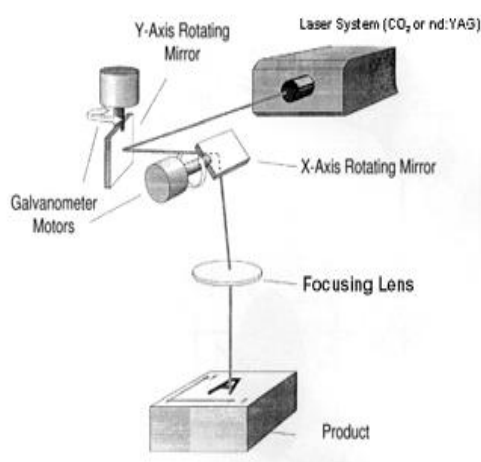


Figura 14: sistema di movimentazione galvanometrico.

Generalmente nelle operazioni di marcatura non è previsto l'uso del gas d'assistenza. Piuttosto, durante le operazioni di engraving, è preferibile usare un sistema di aspirazione per asportare il materiale vaporizzato durante la lavorazione.

1.6 Considerazioni sulla sicurezza laser

Tutte le apparecchiature laser producono raggi di luce monocromatica intensa che può presentare rischi biologici e potenziali. Questi rischi dipendono da numerosi fattori incluso la lunghezza d'onda, il potere energetico del raggio e la durata dell'emissione. L'occhio è l'organo più vulnerabile, specie se si prende cura di focalizzare la luce dal laser sulla retina, che a causa dell'azione di focalizzazione del cristallino aumenta drasticamente la densità di energia. Se la potenza del laser è sufficientemente alta, l'esposizione al raggio può causare anche danni alla pelle.

Esiste una normativa che classifica la sorgente laser in funzione dei suoi effetti sull'uomo e limita le applicazioni in funzione delle caratteristiche stesse. Dall'analisi di questa normativa risultano sicuri solo le sorgenti di Classe I, Classe II e Classe III, a questa si va ad aggiungere la presenza dell'ordinanza 16 luglio 1998, Gazzetta Ufficiale n. 167 del 20-07-1998, che impedisce la vendita di puntatori di classe uguale e/o superiore a quella III. Tuttavia solo le sorgenti di Classe I risultano intrinsecamente sicure per i fini suddetti.

L'incolumità al laser è coperta dalla normativa BS (EN) 60825 che richiede la classificazione del laser secondo le caratteristiche del raggio. Questa normativa è essenziale per tutti gli utenti laser e per i produttori di oggetti utilizzando sorgenti laser. Quando sono classificati come apparecchiature O.E.M., lunghezza d'onda e condizioni di potenza di uscita sono conformi alla Classe I, Classe II, Classe III dei prodotti laser. Un laser O.E.M., può avere bisogno dell'aggiunta di un indicatore di 'on' visibile, un interruttore di raggio ed un interruttore a chiave, per essere completamente conforme a tutte le richieste della certificazione descritta nel BS (EN) 60825. Comunque, qualsiasi prodotto che incorpora un laser deve essere certificato secondo le sue normative, indipendentemente dal fatto che il laser sia certificato o non. Il modo col quale il laser è usato in un prodotto può alterare anche la sua classificazione originale, è perciò la responsabilità del fabbricante del prodotto assicurare conformità con gli standard attinenti.

I prodotti laser di Classe I emettono luce visibile e non rappresentano in alcun modo un potenziale pericolo per il corpo umano.

I prodotti laser di Classe II emettono luce visibile e sebbene non siano completamente sicuri, la protezione dell'occhio avviene normalmente come risposta di avversione, incluso il battito di ciglia. Un'osservazione casuale non è pericolosa, specie se sono utilizzati aiuti ottici (occhiali, binocoli, telescopi, ingranditori e apparecchiature simili). L'utente dovrebbe evitare di guardare fisso nel raggio. Nessun danno della pelle risulterà all'esposizione al raggio.

I prodotti laser di Classe III possono emettere radiazione visibile o invisibile, sono potenzialmente pericolosi se un raggio diretto o una riflessione speculare è vista da un occhio indifeso (vista del raggio). Le precauzioni seguenti dovrebbero essere prese per evitare una vista diretta del raggio e per controllare riflessioni speculari.

- Il laser dovrebbe essere utilizzato solamente in un'area controllata.
- Si deve prendere cura a prevenire riflessioni speculari non intenzionali.
- Il raggio laser dovrebbe essere terminato, dove possibile, alla fine del suo percorso utile da un materiale che lo diffonda e di colore e riflessione tali da far sì che il pericolo del raggio sia ridotto al minimo.
- Si richiede protezione dell'occhio se c'è qualsiasi possibilità di osservazione diretta, o riflesso speculare, del raggio o di una riflessione diffusa.

- Agli ingressi di aree controllate dovrebbero essere affissi segnali di avvertimento laser. Qualsiasi compagnia o organizzazione che intenda usare un laser di Classe III, o laser di potenza e lunghezza d'onda comparabile, dovrebbe nominare un addetto alla sicurezza il cui compito è quello di assicurare che le procedure di sicurezza siano correttamente seguite in ogni momento.

2.1 Introduzione

Il taglio laser viene oggi largamente utilizzato a livello industriale nella lavorazione sia di elementi piani (con spessori variabili da pochi millesimi di millimetro fino a 30 mm circa), sia di componenti a geometria 3D estremamente complessa, grazie all'elevato grado di automazione ottenibile con questa tecnologia.

La possibilità di concentrare elevatissime densità di potenza su spot di dimensioni ridotte (in alcuni casi anche inferiori al micron) ha reso alla tecnologia laser un ruolo di primissima importanza anche nel *microprocessing*.

Sono sempre più frequenti, infatti, i settori in cui si ricorre alla realizzazione di componenti di dimensioni sub-millimetriche tramite operazioni di laser *microcutting* e *microdrilling*.

Durante il processo, il materiale investito direttamente dal fascio laser verrà fuso e/o vaporizzato (a seconda del tipo di materiale trattato ed a seconda dell'energia fornita) mentre un getto di gas coassiale al fascio provvederà ad allontanare il materiale dalla zona interessata. Verrà a generarsi un canale verticale detto *key hole* che si sviluppa lungo tutto lo spessore e che garantisce la separazione dei pezzi.

L'energia fornita dal fascio laser in parte permetterà il passaggio di fase del materiale, in parte verrà dissipata per conduzione all'interno del bulk ed in parte verrà assorbita e/o riflessa dal plasma che viene a formarsi all'interno della stessa *key hole*, in seguito alla vaporizzazione del materiale stesso (fig. 1).

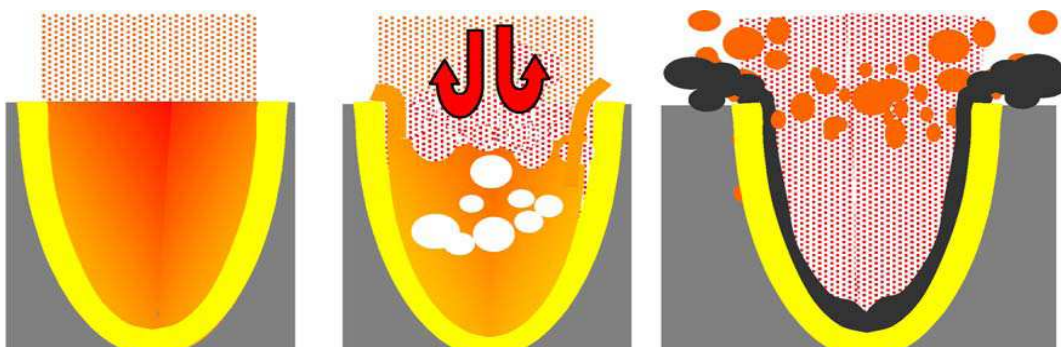


Figura 1: schematizzazione del processo di formazione del Key Hole.

La quantità di materiale asportata andrà diminuendo lungo lo spessore e di conseguenza la larghezza dal lato d'ingresso sarà maggiore della larghezza d'uscita. Il sentiero di taglio avrà una forma in sezione *trapezoidale* (fig. 2-A) e per quantificare questo effetto è definito l'*angolo di conicità* che indica il grado di inclinazione delle pareti del sentiero di taglio. Il *taper angle* (tipico del processo di taglio laser) è definito tramite la:

$$\vartheta = \tan^{-1} \left(\frac{L_{sup.} - L_{inf.}}{2 \cdot spessore} \right)$$

In fig. 2-B, è riportata un'immagine relativa al taglio di una lamiera piana.

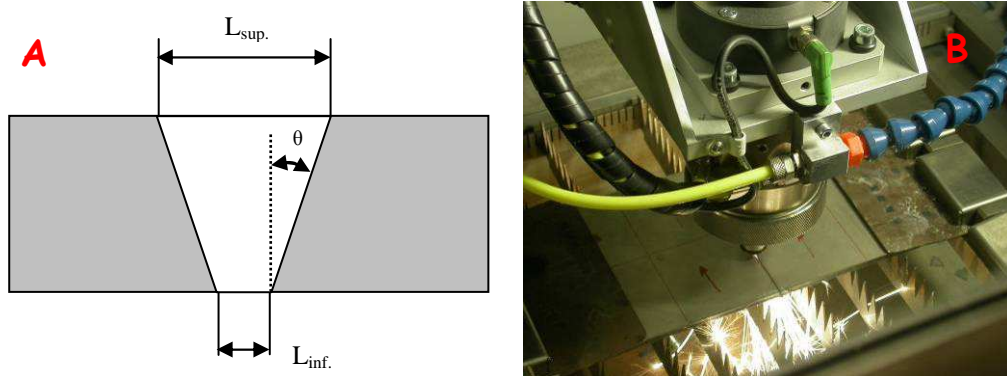


Figura 2: sezione del sentiero di taglio (A); fase di taglio (B).

Le sorgenti laser comunemente usate nel taglio sono sia quelle a CO₂ che quelle a stato solido (sia a Nd:YAG che a Y:YAG), poiché solo queste due tipologie riescono a garantire potenze sufficienti unitamente a spot di focalizzazione adeguati.

Le sorgenti possono avere un funzionamento in regime impulsato oppure in regime continuo. Nel primo caso, però, è possibile ottenere valori di potenze impulsive (nell'ordine dei kW), rilasciati in tempi estremamente brevi (ai nanosecondi). In tal modo è possibile vaporizzare praticamente ogni materiale, pur disponendo di potenze medie relativamente basse (o comunque nell'ordine dei W), riducendo così il carico termico indotto sul materiale in lavorazione e tutti i problemi ad esso collegato.

Nella modalità di funzionamento in regime impulsato, il taglio è prodotto dalla sovrapposizione parziale di una serie di singoli fori consecutivi generati da ogni impulso, come schematizzato in fig. 3.

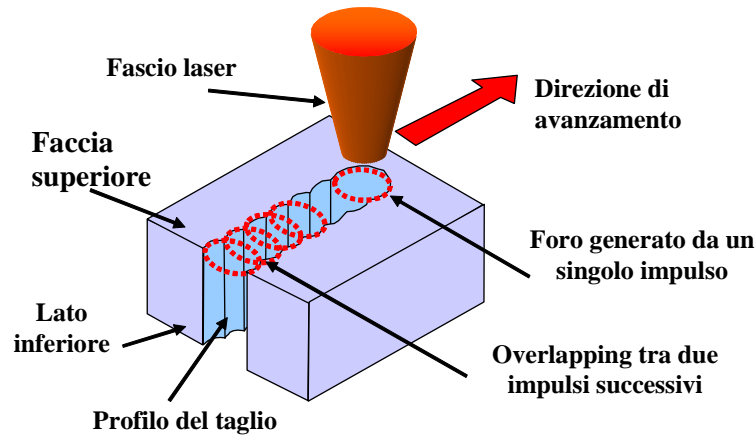


Figura 3: schematizzazione del processo di taglio in regime impulsato.

La percentuale di sovrapposizione dipenderà dal diametro del foro (d), dalla rapidità spaziale e temporale con la quale due fori consecutivi (perciò due impulsi) si susseguono, quindi dalla velocità (v) e dalla frequenza di ripetizione (f). Il fattore di ricopertura ($R\%$) lega le quantità su menzionate per mezzo della seguente:

$$R\% = \left(1 - \frac{v}{f \cdot d}\right) \cdot 100$$

ed è un parametro estremamente importante da cui dipenderà la qualità della lavorazione.

Un fattore di ricopertura basso unito ad un angolo di conicità elevato può portare alla formazione di tagli che seppure passanti, presentano del materiale dal lato di uscita che attua un azione di tenuta (*bridging*), evitando la separazione dei lembi. Il sentiero dal lato d'ingresso, invece, sarà caratterizzato da ondulazioni che tenderanno ad aumentare al diminuire delle fattore di ricopertura (fig. 4)

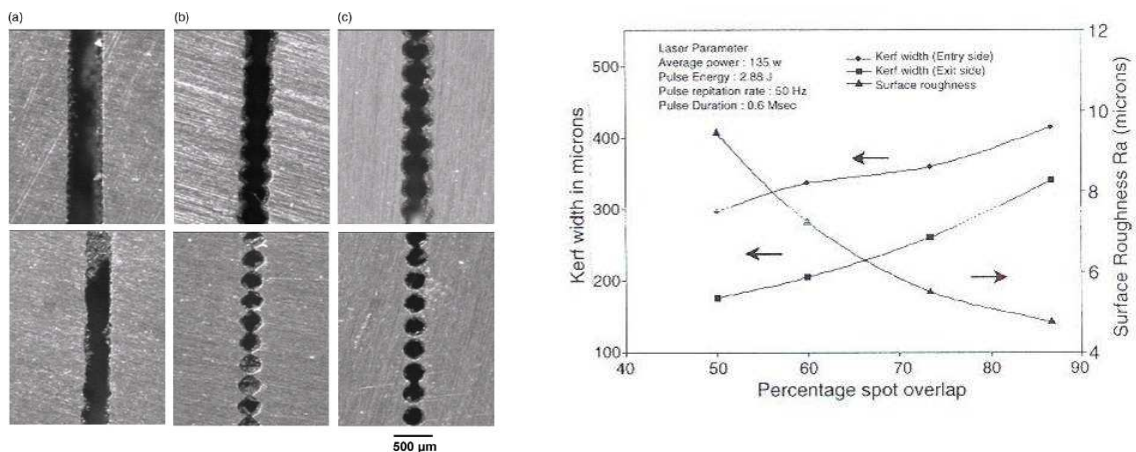


Figura 4: Effetto della variazione dell' $R\%$ sulla qualità del taglio [5].

Al contrario, fattori di ricopertura troppo elevati da un lato potrebbero comportare velocità di taglio comunque basse (sempre in dipendenza dalla frequenza e dal tipo di laser usato), dall'altro un eccessivo carico termico sul materiale; infatti, fattori di ricopertura troppo vicini al 100% tendono comunque ad approssimare una modalità di interazione molto simile ad un regime continuo.

2.2 Meccanismi di taglio

Un taglio laser si può ottenere attraverso diversi meccanismi:

- *Taglio per vaporizzazione*: Il materiale viene vaporizzato istantaneamente dal fascio laser senza che ci sia produzione di materiale fuso, generando quindi un solco di taglio in maniera istantanea. In genere si utilizzano laser Nd:YAG operanti in regime impulsato poiché per raggiungere la temperatura di vaporizzazione sono richiesti valori di densità di potenza impulsiva molto elevati (per l'acciaio pari circa 10^6 W/cm^2). La qualità del solco ottenuto è molto buona e la produzione di fuso è limitata, riducendo notevolmente la formazione di bava.
- *Taglio per degradazione chimica*: L'aumento di temperatura porta ad una rottura dei legami chimici che costituiscono i "ponti" tra le molecole del materiale. Si capisce che l'interazione del fascio con questi materiali è fortemente dipendente dalla natura molecolare dello stesso.
- *Ossi-taglio laser*: il materiale portato a fusione dal fascio è colpito da un getto di ossigeno dando origine ad una reazione di ossidazione. La reazione di ossido-riduzione, essendo esotermica, fornisce un'ulteriore aliquota di energia che favorisce l'asportazione di materiale, permettendo, così, un aumento sostanziale della velocità di lavoro. Una volta attivata, la reazione di ossido-riduzione è estremamente violenta ed il fronte fuso avanza molto velocemente. Con questo tipo di taglio, però, si ottiene una superficie profondamente ossidata, tanto che a volte è necessario rimuovere l'ossido mediante spazzolatura o decapaggio.

L'ossidazione fa peggiorare la qualità del taglio e si preferisce dunque ridurre la quantità di ossigeno per limitare la violenza della reazione. L'aria, avendo una composizione indicativamente di 80% azoto e 20% ossigeno consente di

ottenere un meccanismo di taglio intermedio tra quello inerte e quello assistito ossigeno.

- *Taglio per fusione*: Il fascio laser riscalda il materiale fino a portarlo a fusione; una volta fuso il materiale viene allontanato dal sentiero dalla spinta esercitata dal gas di assistenza che in questo caso è inerte.

I gas maggiormente usati sono l'azoto, l'elio e l'argon. Tra questi il più utilizzato è l'azoto sebbene il suo utilizzo possa causare la formazione di nitruri o fasi particolari che compromettono alcuni aspetti funzionali del materiale.

La superficie tagliata risulta caratterizzata da striature verticali che sono legate al processo di generazione del solco. A seconda del tipo di materiale lavorato ed a seconda dei parametri energetici l'entità di queste striature può essere più o meno marcata, compromettendo la qualità dei sentieri.

- *Taglio per degradazione chimica*: la rimozione di materiale non avviene né per fusione né per vaporizzazione, ma l'energia fornita dal fascio porta alla formazione di nuovi composti chimici conseguenti alla rottura locale dei legami atomici. È il meccanismo tipico che viene ad instaurarsi nella lavorazione dei polimeri e dei materiali organici (legno e pellami), anche se nel secondo caso si parla più semplicemente di *carbonizzazione*. Il gas d'assistenza serve solo ad allontanare il materiale prodotto durante l'interazione.

Più in generale, possiamo dire che essendo il taglio laser un processo di carattere termico il volume di materiale fuso e/o vaporizzato, o comunque rimosso, è proporzionale all'energia fornita dal fascio laser al volume stesso e quindi l'innescarsi di un meccanismo piuttosto che di un altro, sarà comunque collegato alla densità di potenza fornita oltre che al tipo di materiale. In figura 5 è presentato un confronto qualitativo tra i diversi tipi di taglio.

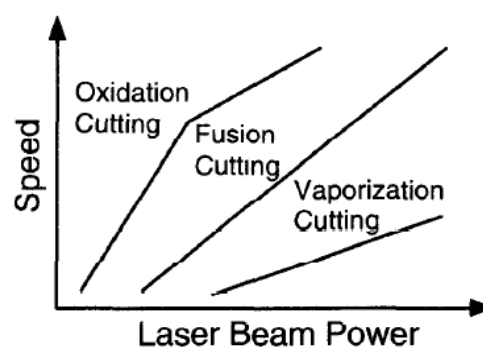


Figura 5: Velocità di lavoro in funzione della potenza per i tipi di taglio [3].

Da questa considerazione si giunge ad una relazione energetica molto importante che ci può far ragionare su alcuni parametri controllabili durante il taglio:

$$\frac{P}{b \cdot h \cdot v} = \text{costante}$$

dove P è la potenza del fascio laser, v è la velocità di avanzamento, h è la profondità del solco di taglio e b la sua larghezza. Si può intuire che, volendo, ad esempio, aumentare lo spessore tagliabile mantenendo costante la quantità di energia per unità di lunghezza fornita, è importante ridurre il più possibile l'ampiezza del solco generato. Volendo invece ridurre i tempi di produzione, a parità di spessore tagliabile, un solco stretto ci consente di aumentare la velocità di avanzamento del fascio sul materiale.

Un discorso a parte meritano i materiali polimerici per i quali il taglio avviene per degradazione chimica (per i termoindurenti) o per fusione (per i termoplastici). A seconda della tipologia di polimero lavorato, la qualità del processo può essere più o meno spinta, ma in generale si prestano bene ad essere tagliati.

Nel taglio dei materiali plastici si presenta il rischio di generazione di fiamma e di rilascio di fumi tossici e quindi si prendono particolari precauzioni per evitare l'innescò della fiamma (flusso molto forte di gas non reattivo nella zona di lavorazione) e l'evacuazione dei fumi dalla zona dove si trovano gli addetti ai lavori.

2.3 Vantaggi e svantaggi nell'uso della tecnologia laser

I principali vantaggi derivanti dall'adozione di un sistema di taglio mediante laser sono i seguenti:

- *Processo estremamente rapido*: la velocità di taglio è tra le più elevate che si riescano ad ottenere con le tecnologie a fascio energetico, soprattutto per bassi spessori.
- *Solco di taglio stretto*: il sentiero di taglio è molto stretto e consente di contenere gli sfridi di lavorazione (oltre che, ovviamente, tagliare a gran velocità).
- *Qualità elevata*: la qualità dei lembi ottenuti è generalmente molto buona, tanto da non richiedere ulteriori lavorazioni di finitura.

- *Processo facilmente automatizzabile*: il processo di taglio laser è facilmente automatizzabile, specialmente per i fasci prodotti da sorgenti Nd:YAG che possono essere trasmessi in fibra ottica.
- *Assenza di forze*: siccome durante il taglio non si sviluppano forze di lavorazione, non è richiesto il vincolo del pezzo.
- *Assenza di usura*: l'utensile utilizzato nel taglio laser non è soggetto ad usura e non sono quindi richiesti fermi macchina per sostituire l'utensile usurato.
- *Taglio omni-dimensionale*: il taglio può avvenire in una qualunque direzione.
- *Taglio silenzioso*: la rumorosità del processo è notevolmente contenuta.

I principali svantaggi del processo di taglio mediante laser sono i seguenti:

- *Costo del sistema*: i sistemi laser sono piuttosto costosi, sia in termini di costo d'acquisto che, in misura minore, in termini di costo d'esercizio e manutenzione. Per questo motivo, l'elevato investimento associato ad un impianto laser richiede elevati volumi produttivi per essere giustificato sul piano economico.
- *Limite negli spessori tagliabili*: il laser non può tagliare spessori elevati (circa 20 mm per i metalli anche se, in applicazioni particolari si è giunti alla lavorazione di spessori di valore doppio, con qualità decisamente peggiore).
- *Processo termico*: il taglio laser è un processo termico, alcuni materiali possono subire un danneggiamento durante la lavorazione.

2.4 Difetti ed imperfezioni

Le diverse normative definiscono le possibili imperfezioni, difetti e tolleranze dimensionali ed impongono dei criteri di indagine per quantificare la qualità del taglio laser.

Definendo *imperfezione* una qualsiasi irregolarità rispetto alla forma specificata del taglio e *difetto* un'imperfezione non accettabile, la normativa fissa:

- *Imperfezioni sui bordi di taglio*: danneggiamento della faccia di taglio dovuta ad una fusione o ad una asportazione di materiale nella zona di taglio.
- *Imperfezione sulle facce di taglio*: deviazione dal profilo di taglio richiesto. Appartengono a questa categoria imperfezioni quali deviazioni geometriche,

allargamento del solco di taglio, deviazione dell'angolo di taglio, profilo irregolare, formazione di solchi, fine del taglio incompleta.

- *Scoria e cricca*: le scorie possono aderire al bordo inferiore della faccia di taglio, mentre le cricche sono delle discontinuità dovute ad una rottura locale del materiale.
- *Taglio incompleto*: il taglio finisce in pieno materiale nel senso dello spessore del taglio o nel senso di avanzamento.
- *Bruciatura della superficie*: surriscaldamento della superficie esterna del materiale.

Per valutare la qualità in termini dimensionali di un lembo tagliato laser, è possibile adottare anche la normativa che definisce ed impone ulteriori criteri di indagine per qualificare:

- Inclinazione delle pareti laterali del lembo generato.
- Finitura superficiale delle pareti laterali.
- Errori dimensionali.

Altri aspetti critici di cui bisognerà tener conto durante l'esecuzione di un taglio mediante laser sono:

- *Formazione di Bava*, che si può sviluppare esclusivamente nel taglio per fusione. La bava si forma sullo spigolo inferiore del bordo tagliato a seguito della repentina solidificazione del materiale fuso che viene espulso dal solco stesso ad opera del getto di gas. Proprio per questo motivo uno dei parametri su cui agire per evitare la formazione di bava è proprio la pressione del gas; aumentando quest'ultima aumenta la spinta sul fuso e quindi la sua evacuazione. Il problema della bava è particolarmente evidente nel taglio dei materiali metallici e spesso è costituita da un ossido metallico estremamente fragile, facilmente rimovibile mediante spazzolatura.
- *Zona termicamente alterata (ZTA)*, con la cui espressione si intende quella porzione di materiale prossima al lembo generato che ha subito, durante il taglio, un'alterazione a causa del ciclo termico. Quindi il materiale presenta una struttura cristallina differente dal materiale base, con caratteristiche meccaniche diverse da quelle del materiale base. L'ampiezza e la struttura presente nella

ZTA sono legate al campo termico generato e quindi ai parametri di processo adottati. In generale, maggiore è la velocità del taglio e minore è l'estensione della ZTA dato che diminuisce il tempo di interazione tra fascio laser e materiale.

- *Zone critiche* che possono richiedere particolari accorgimenti al fine di evitare una riduzione della qualità del taglio stesso. Quando si parla di zone critiche si fa, in genere, riferimento agli spigoli, al punto finale del taglio ed al punto iniziale. Relativamente al punto iniziale, è necessario che il laser fori il materiale prima di iniziare il taglio vero e proprio, in un punto che non appartenga al pezzo da dover realizzare. Infatti il foro d'inizio è generalmente di diametro elevato ed il materiale attorno ad esso risulta danneggiato termicamente per una zona elevata. Per il punto finale valgono le stesse considerazioni. Gli spigoli presentano un problema di carattere termico, in quanto il materiale subisce un riscaldamento maggiore rispetto al resto del sentiero che causa un arrotondamento del bordo. Un'attenta selezione del percorso da eseguire può comunque eliminare questi problemi.
- *Portata e pressione del gas* che avrà oltre allo scopo di allontanare il fuso dal solco di taglio, raffreddare le zone vicino al lembo generato, proteggere la lente di focalizzazione da proiezioni di materiale fuso. In alcuni casi, può contribuire a fornire l'energia necessaria alla fusione del materiale, come già visto in precedenza.

Nel seguito (fig. 6-7-8) si riportano alcuni esempi dei difetti precedentemente descritti.

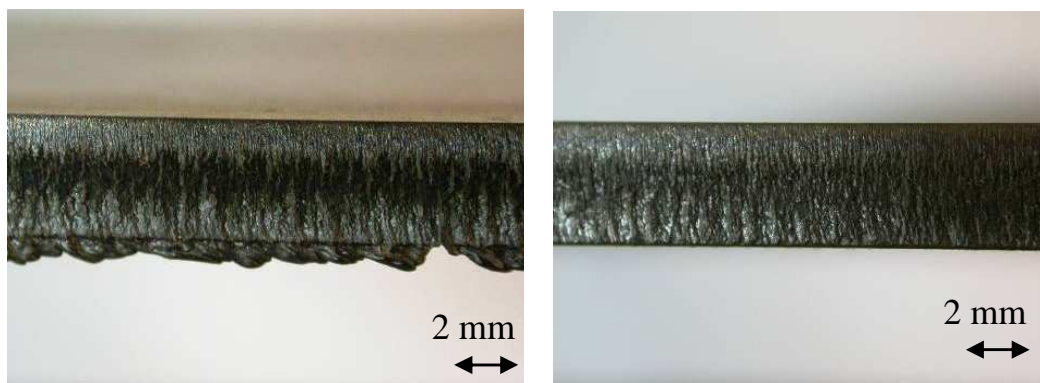


Figura 6: taglio laser si lega di titanio prima e dopo spazzolatura.

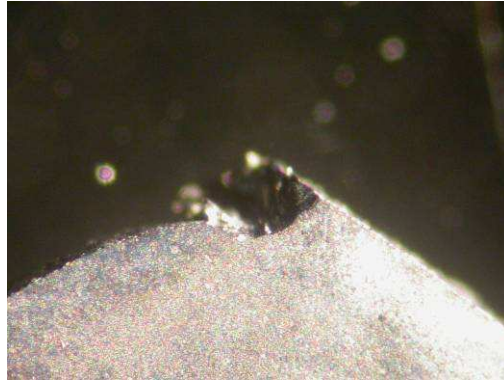


Figura 7: errato punto d'ingresso nel taglio di geometria complessa di silicio.

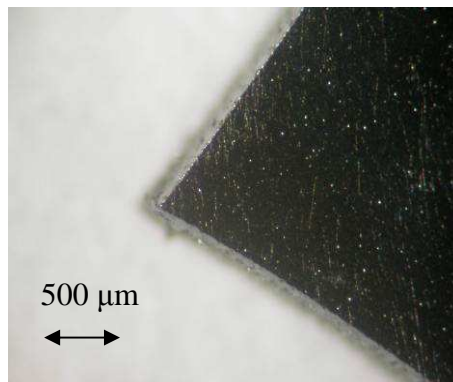


Figura 8: esempio di spigolo tagliato su silicio.

Nel caso particolare del taglio laser di materiali compositi, bisognerà tener conto di ulteriori difetti, quali:

- *Delaminazione*: Si è visto come, salvo rari casi, i rinforzi siano conduttivi. Nel caso in cui questi siano di forma fibrosa si avrà che nel momento in cui il fascio laser arriva alla fibra, produca un flusso termico lungo tutta la fibra. Il calore avrà quindi una corsia preferenziale rappresentata dalla fibra all'interno del composito, dovuta anche alla anisotropia nelle proprietà termiche esistente tra la fibra conduttrice e la matrice isolante. Questo flusso termico innalzando la temperatura locale intorno alla fibra tenderà a degradare la matrice. All'interfaccia tra due lamine dello stesso laminato questo degrado tenderà a distaccare queste lamine tenute insieme solo dalla matrice. Così si avrà un indebolimento tra le lamine che quindi diminuisce le resistenza del composito agli sforzi interlaminari.
- *Bridging*: è un tipico difetto connesso con le differenti proprietà termiche di fibra e matrice. Un ridotto apporto termico, infatti, può permettere la vaporizzazione della matrice, ma è possibile che la fibra non abbia ricevuto

abbastanza energia per vaporizzare. Questo dà luogo a fibre che fuoriescono dalla sezione di materiale e che tendono a mantenere uniti i due lembi di taglio rendono particolarmente difficile la netta separazione dei componenti. Ciò compromette la qualità del taglio, creando la necessità di ulteriori lavorazioni e quindi dispendio di tempo e innalzamento dei costi.

2.5 Confronto con tecnologie alternative

Le alternative al taglio laser sono molteplici e la scelta dipende da parametri tecnico-economici. Le tecnologie alternative maggiormente usate sono:

- *Tranciatura.* Un elemento mobile (punzone) sollecita la lamiera posta su un elemento fisso (matrice). Matrice e punzone devono essere sagomati in modo da ottenere la geometria desiderata, il laser risulta dunque molto più versatile, veloce e flessibile.
- *Abrasive water jet.* Un getto d'acqua ad alta pressione (4000 bar) viene fatta fluire ad elevata velocità (500 m/s) attraverso un ugello di piccolo diametro sul pezzo da tagliare ed è quindi usato come utensile da taglio per materiali metallici e non. Come del laser, non esiste contatto tra pezzo ed utensile ma il materiale è asportato essenzialmente per erosione. Al fluido vengono spesso addizionate particelle di materiale abrasivo al fine di aumentare l'efficienza del processo. Risulta decisamente meno preciso a causa del sentiero di taglio particolarmente grande (generalmente 2 mm), ma non da problemi di danneggiamento termico. È tuttavia un processo estremamente dispendioso in termini energetici a causa dei sistemi meccanici necessari a raggiungere questi valori di pressione ed anche estremamente rumoroso.
- *Plasma.* Consiste nella generazione di un solco di taglio attraverso la fusione localizzata di materiale generata da un arco elettrico stabile instaurato tra un elettrodo e il pezzo in lavorazione. Il vantaggio rispetto alla tecnologia laser è il costo decisamente più contenuto degli impianti, anche se il solco generato è più ampio e di qualità minore ed è possibile lavorare solo materiali conduttivi.
- *EDM a filo:* L'elettroerosione è un processo che consiste nell'asportare materiale mediante una serie di scariche elettriche che vengono generate tra due poli costituiti da utensile e pezzo in lavorazione. Si possono lavorare solo i

materiali conduttori di elettricità, qualunque sia la sua durezza. Nella sua variante “a filo”, per l’EDM si utilizza come elettrodo un filo conduttore teso e continuamente ricambiato, più lungo dello spessore del pezzo da tagliare in modo che il taglio sia sempre passante.

In fig. 9 si riporta un confronto diretto tra alcuni tagli realizzati su un laminato CFRP dello spessore di 1.5 mm tramite laser, abrasive water jet e fresatura.

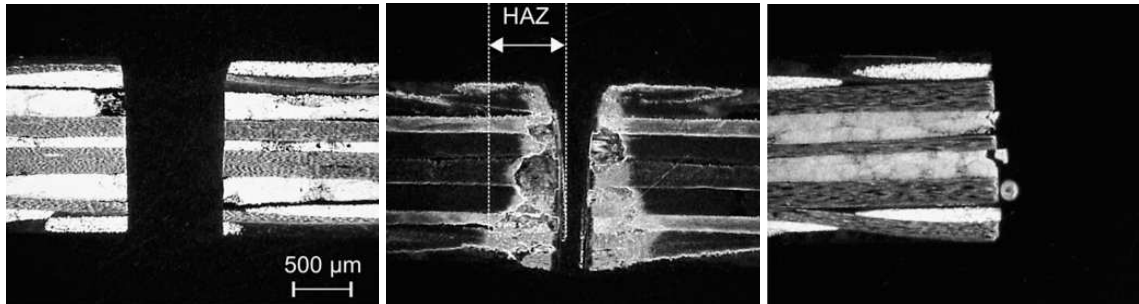


Figura 9: confronto tra sezioni di taglio realizzate tramite diverse tecnologie (da sx: AWJ, LB, fresatura) [6].

Una tecnologia del tutto innovativa anche se ancora in fase di sperimentazione è l’idrotaglio laser (fig. 10).

Questa tecnologia ancora presenta poco applicazioni in ambito industriale ma è in grado di esaltare differenti caratteristiche connesse a quella laser ed al water jet.

In questo caso, il fascio laser è inserito all’interno di un getto d’acqua che funge da guida d’onda e questo permette di annullare tutti gli svantaggi del tradizionale laser primo tra tutti il carico termico sul materiale lavorato. Inoltre, siccome non è più utilizzato gas in pressione ma acqua, le superfici non necessitano di una pulitura ulteriore e la distanza di lavoro, più elevata, consente il taglio anche di pezzi non piani con la stessa larghezza del solco.

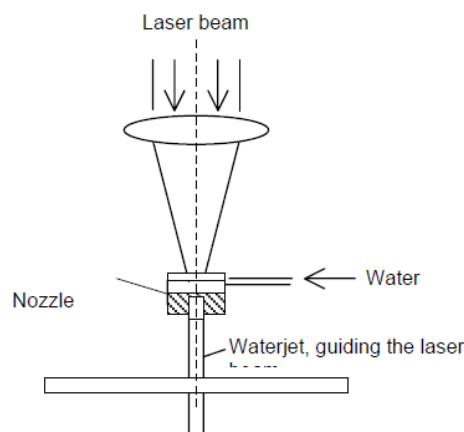


Figura 10: caratteristiche geometriche dei solchi ottenibili con varie tecnologie di taglio.

Nella tabella seguente si riporta un diretto confronto tra le tecnologie di taglio sin qui trattate.

Tabella 1: confronto con altre tecnologie di taglio [2].

COMPARISON OF DIFFERENT CUTTING METHODS TO LASER CUTTING			
Method	Material Thickness Practical Maximums mm (inch)	Advantages	Drawbacks
Oxyfuel Cutting (OFC)	1,220 (48)	low cost, portable, easy to use	slow, accuracy limit, large kerf, large HAZ, thermal distortion, fumes, metals only
Plasma Arc Cutting (PAC)	50 (2)	lower capital cost, fairly portable,	high consumable cost, accuracy limit, large kerf, large HAZ, thermal distortion, noise, ultraviolet rays, dust and fumes, metals only
Laser	20 (0.75)	high speed and accuracy, flexibility	high capital cost, material restrictions, thickness limitations, fumes
Water Jet	150 (6) non-metals 25 (1) metals	cut any material, cut stacked material, no HAZ, no recast, no dross, no fumes	high operating cost, disposal of metal contaminated abrasive, larger kerf, noise, tool wear
Punching (Nibbling)	13 (0.5)	lowest cost per piece for high volume, accurate, reliable	shear edge distortion, requires fixed tooling and dies, set-up time, noisy, nibbles arcs, metals
Blanking (Stamping)	3 (0.12)	low cost per part, fast	high changeover cost and time, more material waste, metals
Wire EDM	100 (4)	most accurate, high edge quality, non-contact	slow, electrode wear, wire cost, metals only

CAPITOLO 3

Attrezzature sperimentali impiegate

3.1. Introduzione

Di seguito vengono descritte le diverse strumentazioni utilizzate nei tre anni di attività sia per la realizzazione dei campioni sia per la fase di analisi degli stessi.

Le sorgenti laser descritte, disponibili presso il CIRTIBS (sede Napoli), si differenziano per la lunghezza d'onda del fascio generato, per la potenza media erogata e per l'architettura della sorgente stessa. Ciò ha permesso quindi un'attenta analisi ed accurato confronto sul meccanismo di interazione tra fascio laser e materiale trattato in modo tale da determinare quale fosse la sorgente laser che meglio si adattasse alla lavorazione di uno specifico materiale.

Per ciascuna sorgente si è resa poi necessaria una pre-fase di studio durante la quale sono state determinate le varie curve di funzionamento.

Attraverso il power meter composto da testa termica OPHIR F150A-SH e misuratore NOVA è stata valutata la variazione di potenza media erogata in funzione degli altri parametri energetici regolabili tramite il controller di ogni singola sorgente.

3.2. Sistema laser Rofin

3.2.1 Rofin-StarCut 150.

La sorgente laser STARCUT 150 della ROFIN è una sorgente a stato solido (Nd:YAG) a regime di funzionamento impulsato, pompato tramite lampada flash. Il fascio generato ha una lunghezza d'onda di 1,064 μm mentre la massima potenza media erogabile è di 150 W.

La sorgente StarCut 150 consente di variare la tensione di alimentazione, la frequenza di ripetizione e la durata degli impulsi, allo scopo di ottenere diversi valori di potenza media e quindi di potenza impulsiva ed energia impulsiva. A titolo di esempio, in fig.1, si riportano alcune delle curve caratteristiche della sorgente, ottenute fissando la tensione di alimentazione a 700 V e variando frequenza di ripetizione e durata dell'impulso.

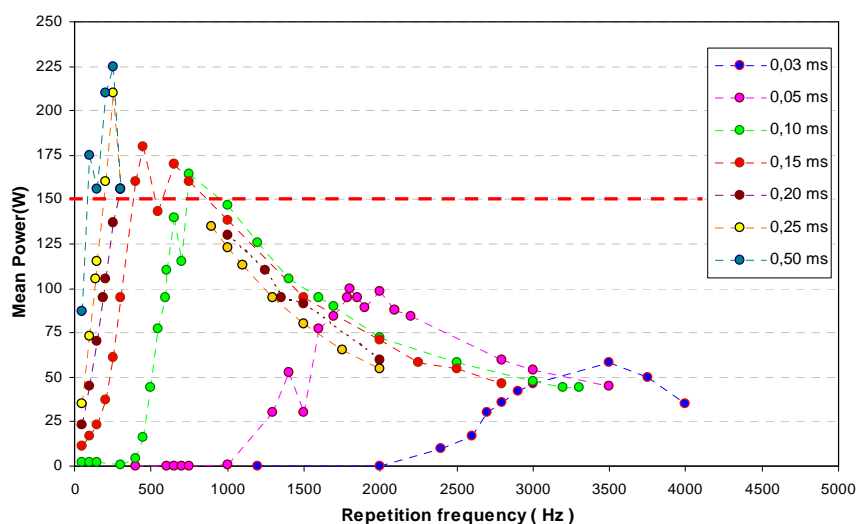


Figura 1: Andamento della potenza media in funzione della frequenza di ripetizione per diverse durate dell'impulso (tensione di alimentazione fissata a 700 V).

Il fascio generato è un multimodo con uno spot di focalizzazione (dichiarato) di 100 μm . Tramite l'ausilio di opportuni diaframmi posizionati all'interno della cavità risonante è possibile filtrare parte del fascio diminuendo l' M^2 e lo spot di focalizzazione. In questa configurazione (*StarCut 18*) si ha una drastica riduzione della potenza media impiegabile, inversamente proporzionale alla qualità del fascio.

In tab. 1 si riporta la variazione delle caratteristiche della sorgente nelle due configurazioni disponibili.

Tabella 1: caratteristiche della *StarCut* nelle configurazioni 18 e 150 [7].

Specifications				
Laser	StarCut 18			StarCut 150
Typ				flash lamp pumped Nd:YAG Laser
Mode	TEM ₀₀	TEM ₁₀	TEM ₂₀	multi-mode
Nominal power max.	7 W	18 W	25 W	150 W
Cutting width min.*	< 20 μm	ca. 40 μm	ca. 100 μm	100 μm
Pulse width	0,03 - 2,5 ms			0,03 - 2,5 ms
Repetition rate	up to 3 kHz			up to 3 kHz
Beam diameter	1 mm - 2,5 mm			6 mm
Beam expansion				optional 1,5 / 2 / 3 / 10 times
Power shutter	switching time ca. 5 ms			switching time ca. 5 ms

*in stainless steel / Nitinol 100 μm thickness with a focal length of 80 mm

Il trasporto del fascio laser fino alla testa di taglio avviene tramite catena ottica costituita da un beam expander 3X, da una serie di specchi piani inclinati di 45° rispetto alla direzione di incidenza del fascio).

L'ultima parte della catena ottica è costituita dalla testa di taglio *Precitec Ak Yk52*. All'interno della testa, il fascio laser passa da un diametro dell'ordine dei millimetri ad uno dell'ordine dei micrometri nel fuoco, grazie ad una lente di focalizzazione, con lunghezza focale di 80 mm.

A valle della lente vi è una camera a geometria conica con sezione decrescente dove viene accelerato il gas di assistenza in modo che arrivi con una certa velocità e pressione (la testa può lavorare fino a pressioni dell'ordine dei 20 bar) coassialmente al fascio laser, nella zona di taglio. La camera termina con un ugello che ha un diametro finale di circa 800 μm .

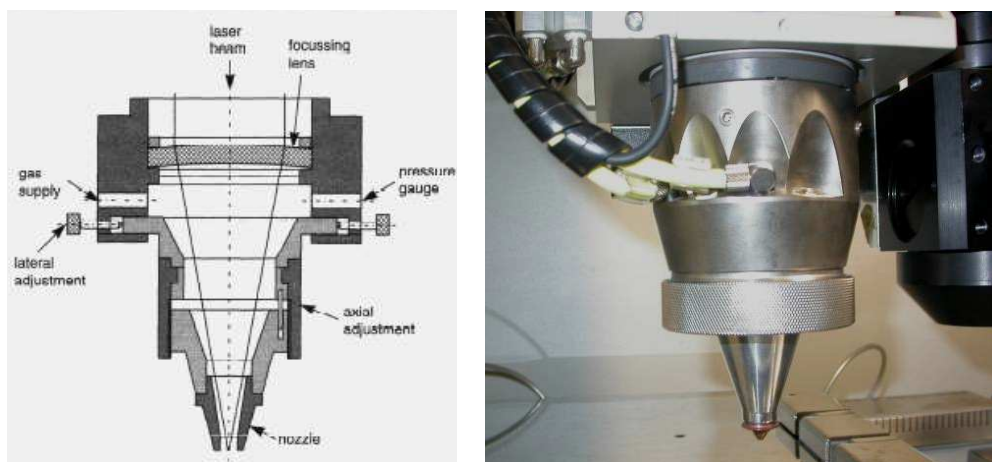


Figura 2: Schema (sx) ed immagine (dx) della testa di taglio laser.

3.2.2 Rofin-Star System Universal

Il sistema laser Rofin StarCut è movimentato tramite un sistema *CNC* (*Control Numeric Computer*) Rofin Star System Universal di tipo cartesiano, gestito da un controllore Siemens 802D in grado di processare *parts programs* in accordo con linguaggio ISO-Norm.

Il sistema è in grado di controllare 4 assi di movimentazione (1 di rotazione e 3 di traslazione) permettendo, tramite motori elettrici di tipo *brushless* ad elevata precisione, alla testa di taglio di compiere traslazioni lungo l'asse Z e l'asse X, ed al pezzo in lavorazione di compiere traslazioni lungo Y e rotazioni lungo W (fig. 3).

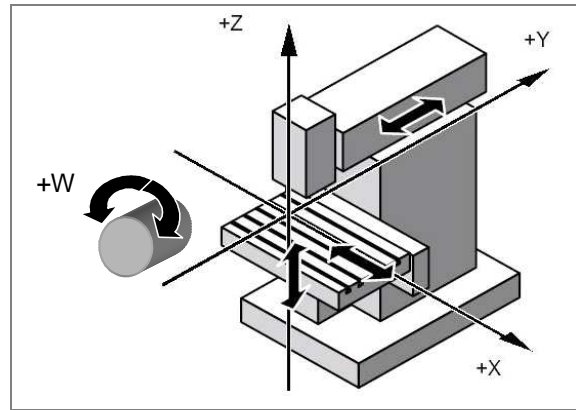


Figura 3: movimentazione assi macchina.

In particolare, la testa di taglio può compiere traslazioni fino a 600 mm lungo l'asse X, traslazioni fino a 300 mm lungo l'asse Y e fino a 200 mm lungo l'asse Z, con velocità massima (per tutti gli assi) di 150 mm/s ed accuratezza di posizionamento di $\pm 20 \mu\text{m}$.

Il pezzo in lavorazione viene posto su un carrello porta-oggetti che ha dimensioni 300 mm x 600 mm e può sostenere carichi fino a 50 Kg. Il pezzo è fermato da un sistema di afferraggio pneumatico formato da due blocchetti posizionati sul carrello porta-oggetti (*cutting box*).

La testa di taglio ed il carrello porta-oggetti si trovano all'interno di una camera di lavoro illuminata (fig. 4). Tale camera di lavoro è isolata dall'esterno per mezzo di due porte scorrevoli ad apertura verticale che rendono agevole l'accesso alla zona di lavoro. Le porte sono dotate di vetro al germanio schermante.

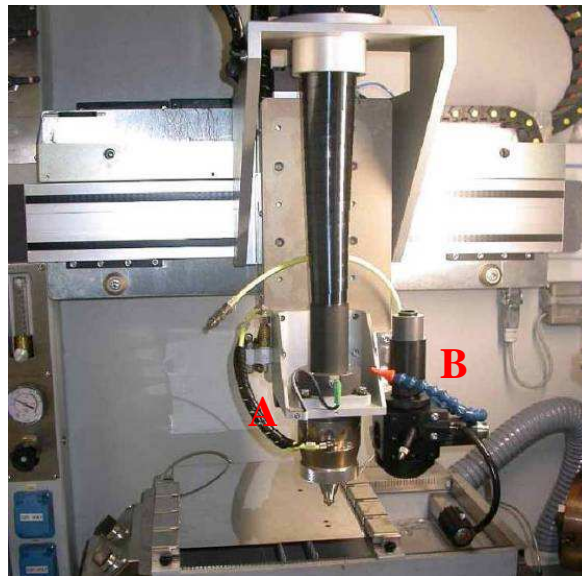


Figura 4: Camera di lavoro in cui sono visibili le due teste di lavoro: taglio (A) e saldatura (B).

All'interno della camera di lavoro sono posizionati anche i controlli per la regolazione della portata e della pressione del gas di assistenza. Le bombole del gas di assistenza sono ospitate in un vano sul retro del controllo numerico.

Il sistema è correlato da un monitor TFT a colori da 10.4" e da un personal computer, con monitor TFT a colori da 14", che facilita il controllo e l'inserimento di codici CAM dall'esterno tramite interfaccia USB o slot. È inoltre presente una videocamera, collegata al personal computer, che permette di monitorare l'intero processo di lavorazione.

Ulteriori caratteristiche della StarSystem Universal sono riportate in tab. 3.

Tabella 2: Specifiche tecniche del Controllo Numerico ROFIN Universal.

Specifiche tecniche	StarSystem Universal
Dimensioni esterne (mm) (largh x alt x prof)	1660 x 1200 x 2185
Dimensioni camera di lavoro (mm) (largh x alt x prof)	870 x 320 x 800
Peso (Kg)	800
Alimentazione elettrica	380/400V, 50-60Hz, 32A
Potenza assorbita	7 kW
Spostamento massimo	Asse X = 600 mm Asse Y = 300 mm Asse Z = 200 mm
Accuratezza di posizionamento	Asse X = $\pm 20 \mu\text{m}$ Asse Y = $\pm 20 \mu\text{m}$ Asse Z = $\pm 20 \mu\text{m}$
Ripetibilità	Asse X = $\pm 10 \mu\text{m}$ Asse Y = $\pm 10 \mu\text{m}$ Asse Z = $\pm 10 \mu\text{m}$

L'intero sistema è dotato di dispositivi di sicurezza in accordo al regolamento sulla sicurezza dei laser di classe 1.

Il controllo numerico Siemens 802D è in grado di processare *part program* in codice ISO tramite il quale è possibile fornire alla macchina le istruzioni necessarie per le operazioni desiderate.

Partendo dalla geometria da realizzare, è necessario fornire la sequenza di istruzioni che indicano le coordinate dei punti attraverso i quali la macchina dovrà spostarsi, la

velocità e la modalità con la quale lo spostamento dovrà avvenire tra i punti stessi (lungo un segmento o lungo un arco di circonferenza orario o antiorario).

Il file da generare dovrà contenere non solo le istruzioni relative agli spostamenti, definiti *G-codes* (tra l'altro comuni ad ogni controllo CNC), ma anche quelle relative alla gestione dei vari sottosistemi presenti nella sorgente prima descritta definiti *M-codes* (apertura dello shutter, apertura del gas d'apporto, accensione del sistema di evacuazione fumi, ecc).

Tramite opportuni software di conversione *cad-cam* è possibile ottenere in modo semplice ed immediato la sequenza degli spostamenti e/o delle rotazioni necessari a ricostruire l'oggetto in esame a partire dal disegno dello stesso

Tra gli altri vantaggi offerti da un software di questo tipo, è presente anche la possibilità di realizzare una simulazione della codifica *CAM* su un qualsiasi computer. È così possibile prevedere, ad esempio, eventuali errori nella geometria oppure preservare la testa di taglio da urti accidentali con le diverse parti all'interno della zona di lavorazione.

In tabella 4 si riporta un elenco dei G-codes e degli M-codes maggiormente utilizzati, mentre in figura 5 si riporta la schermata del software utilizzato durante l'esecuzione di una simulazione.

Tabella 3: G-codes ed M-codes maggiormente utilizzati.

Codici		Funzioni
Codici G	G00	Avanzamento rapido con interpolazione lineare
	G01	Interpolazione lineare
	G02	Interpolazione circolare in senso orario
	G03	Interpolazione circolare in senso antiorario
	G04	Arresto temporizzato
	G90	Coordinate assolute
Codici M	M31	Gas on
	M32	Gas off
	M37	Aspiratore on
	M38	Aspiratore off
	M39	Shutter on
	M40	Shutter off
	M41	Gate on
	M42	Gate off
	M69	Attesa driver on
	M70	Attesa driver off
	M71	Attesa laser ready on
	M72	Attesa laser ready off
	M75	Attesa aspiratore laser on
	M76	Attesa aspiratore laser off

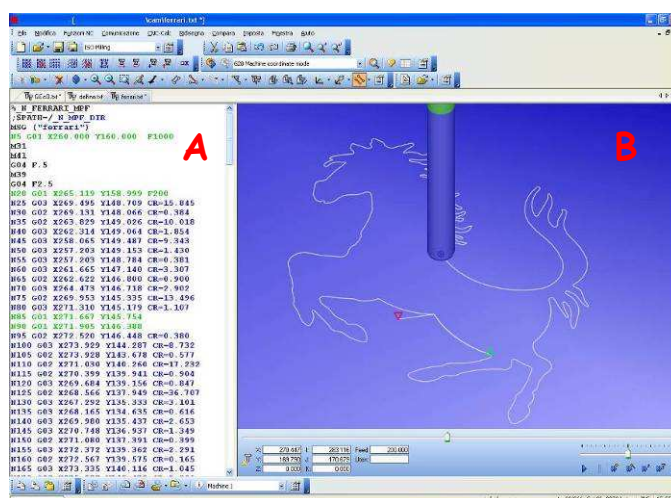


Figura 5: Software di conversione CAD-CAM (A: codice CAM; B: simulazione).

3.3. Sistemi laser Lasit

3.3.1 Lasit Fly

Il sistema laser Lasit Fly è costituito da tre distinte sorgenti (due a stato solido ed una a stato gassoso) in grado di erogare potenze medie differenti e fasci di lunghezza d'onda diverse.

Quelle a stato solido sono due sorgenti a Nd:YAG del tipo DPSS (*Diode Pumped Solid State*) a funzionamento in regime impulsato, generato tramite dispositivo elettro-ottico Q-Switch. La prima (*FlyRed 20*) è in grado di erogare una potenza media di 20 W e genera un fascio laser ad una lunghezza d'onda di 1.064 μm (armonica fondamentale); la seconda (*FlyGreen 5*) eroga una potenza media di 5 W e genera un fascio di 0.532 μm (seconda armonica).

Il fascio alla lunghezza d'onda di 0.532 è ottenuto indirizzando un fascio “tradizionale” (alla lunghezza d'onda di 1.064 μm , poiché comunque generato da una sorgente a Nd:YAG) attraverso un particolare sistema di filtraggio costituito da un cristallo con proprietà ottiche non lineari (KDP) e da un prisma. Questo sistema ha la capacità di assorbire secondo una lunghezza d'onda fondamentale ed emettere un fascio di luce alla seconda armonica (quindi con lunghezza d'onda dimezzata o frequenza raddoppiata).

L'aliquota di radiazione assorbita verrà dissipata sottoforma di calore; per cui una sorgente *Green* avrà un rendimento inferiore rispetto ad una sorgente *Red*. Nel caso delle sorgenti del sistema Lasit FlyAir, partendo da una sorgente con potenza nominale di 20 W a $\lambda = 1064 \text{ nm}$, si ottengono solo 5 W su una lunghezza d'onda $\lambda = 532 \text{ nm}$.

Quella a stato gassoso (FlyCO₂) è una sorgente a CO₂ a regime di funzionamento continuo o impulsato. In questo caso il materiale attivo è eccitato per via elettronica. La potenza media è di 30 W ed il fascio generato ha una lunghezza di 10.6 μm .

Nelle tre sorgenti è possibile modificare la potenza media erogata agendo sulla frequenza di ripetizione degli impulsi oppure sulla corrente di alimentazione dei sistemi di pompaggio.

Le curve caratteristiche sono riportate nelle figg. 6, 7 e 8.

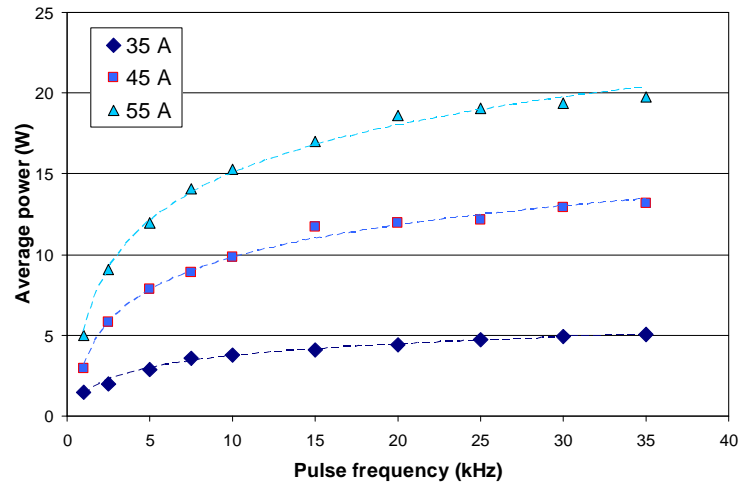


Figura 6: Valori di potenza media in funzione dell'intensità di corrente I [A] e della frequenza di ripetizione degli impulsi f [Hz] per la sorgente FlyRed 20.

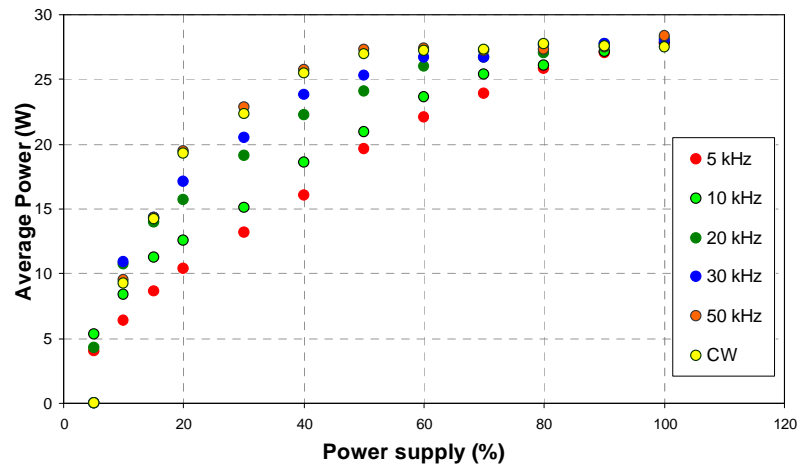


Figura 7: Valori di potenza media in funzione dell'intensità di corrente I [A] e della frequenza di ripetizione degli impulsi f [Hz] per la sorgente FlyCO₂.

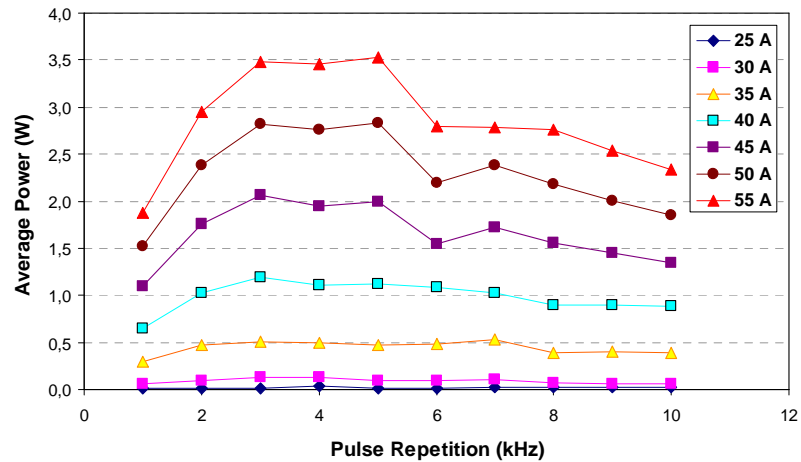


Figura 8: Valori di potenza media in funzione dell'intensità di corrente I [A] e della frequenza di ripetizione degli impulsi f [Hz] per la sorgente FlyGreen 5.

Le tre sorgenti sono dotate di un sistema di movimentazione di tipo galvanometrico e di lenti di focalizzazione con distanza focale diversa: 160 mm per le sorgenti a stato solido e 100 mm per la sorgente a CO_2 . Ciò permette di ricoprire aree di lavoro di diverse dimensioni: 99 mm x 99 mm per le sorgenti FlyRed, FlyGreen e 70 mm x 70 mm per la sorgente Fly CO_2 .

Per effettuare lavorazioni su aree più grandi, il sistema è stato implementato con un carrello porta-oggetto movibile, gestito tramite CNC ed in grado di permettere al pezzo in lavorazione traslazioni lungo le direzioni X ed Y comprese tra 0 e 300 mm.

Il controller CNC è in grado di gestire un ulteriore asse di traslazione Z ed un asse di rotazione W. L'asse Z può traslare tra 0 e 200 mm ed è necessario a garantire il corretto posizionamento dello spot di focalizzazione su pezzi di altezza diversa, mentre l'asse W permette la corretta lavorazione di componenti a geometria cilindrica.

Tutto il sistema è inserito all'interno di un box di sicurezza (fig. 9) dotato di blocco di emergenza e di blocco istantaneo dell'emissione laser all'apertura delle porte.

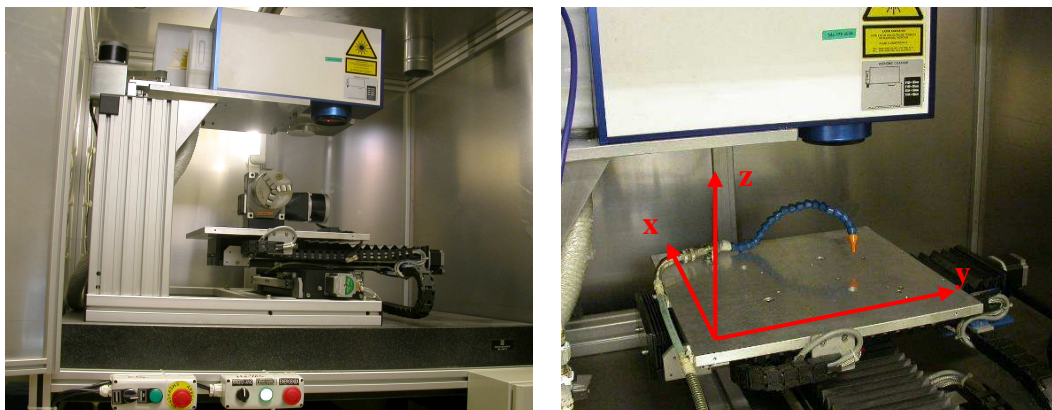


Figura 9: box di sicurezza dei sistemi Lasit Fly con particolare del carrello porta-pezzo.

Il raffreddamento delle sorgenti FlyRed e FlyGreen è ad acqua, con scambiatore di calore (all'interno della sorgente) ed unità *chiller* esterna. La temperatura di esercizio per entrambe le sorgenti è di 22-23° C.

Il raffreddamento della sorgente FlyCO₂ è ad aria forzata (dissipatore termico collegato alla cavità risonante e ventole).

Le principali caratteristiche tecniche delle 3 sorgenti sono riassunte in tabella 4.

Tabella 4: caratteristiche tecniche delle sorgenti Lasit Fly.

Specifiche tecniche	FlyRed 20	FlyGreen 5	Fly CO ₂
Modo	multimodo	multimodo	multimodo
Lunghezza d'onda (nm)	1064	532	10600
Potenza Media (W)	20	5	30
Durata dell'impulso (ns)	150	150	n.d.
Frequenza di ripetizione (kHz)	2-50	2-50	CW 1-50
Distanza focale (mm)	160	160	100
Diametro spot (μm)	circa 120	circa 50	circa 300
Area di lavoro con soli galvanometri (mm)	99x99	99x99	70x70
Area di lavoro con sistema CNC (mm)	300 x 300	300 x 300	300 x 300
Raffreddamento	Ad acqua	Ad acqua	Ad aria

Il disegno della geometria da eseguire è realizzata attraverso il software LasitCAD, poi convertito attraverso il software Flash in un linguaggio CAM direttamente comprensibile dalla macchina. Il software Flash, oltre alla movimentazione permette anche di gestire direttamente i parametri di lavorazione (frequenza di ripetizione, velocità di lavoro, numero di ripetizioni e corrente di alimentazione).

3.3.2 Lasit FlyAir

Tra tutte le sorgenti Red disponibili presso il CIRTIBS è quella meno potente ma anche quella in grado di generare il fascio più pulito, con un $M^2 \approx 1.1$.

È una sorgente pompata a diodi con modulatore di frequenza di tipo Q-switch, in grado di erogare una potenza media di 10 W.

Il fascio è trasportato dalla sorgente alla testa tramite fibra ottica. Il sistema di scansione è di tipo galvanometrico con lente di focalizzazione da 160 mm. L'area di scansione è di 99 mm X 99 mm.

La sorgente è dotata di un sistema di messa a fuoco guidata, movimentata manualmente. La presenza di due diodi laser all'interno dell'unità di scansione permettono la generazione di una linea e di un punto rosso brillante. Quando la linea e il punto sono perfettamente coincidenti si è raggiunta la corretta distanza di fuoco. In questo modo l'operatore trova, sia su superfici piane ma soprattutto su parti che hanno geometrie complesse, in modo immediato e rapido la posizione corretta per una lavorazione ottimale. La luminosità della linea e del punto è variabile ed è controllabile semplicemente via software, permettendo di ottenere la migliore visibilità possibile a seconda dei diversi materiali che vengono processati.

La testa di scansione e la zona di lavorazione sono inseriti all'interno del box di sicurezza (*Lasit Tab*) in grado di fornire sistemi di schermatura e protezione in accordo al regolamento sulla sicurezza dei laser di classe 1.

Nel seguito (fig. 10) si riporta un'immagine del sistema FlyAir 10 assemblato.

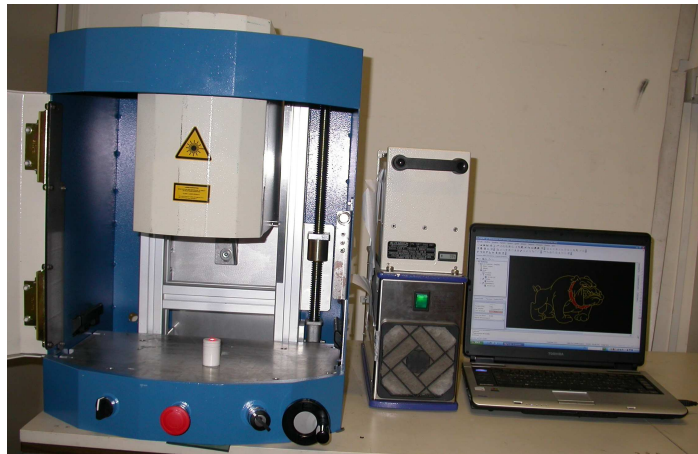


Figura 10: immagine FlyAir 10 e del box di sicurezza.

Il software di gestione è il FlyCAD[®] sviluppato dalla Lasit che rappresenta un'evoluzione del software LasitCAD, poiché implementa in un unico software il sistema di disegno ed il sistema di gestione dei parametri energetici destinati alla lavorazione.

Occorre comunque sottolineare che la sorgente in esame è estremamente valida in lavorazioni di marcatura ma, a causa della bassa potenza erogata, mal si presta ad operazioni di taglio. Di conseguenza, seppur debba essere inserita tra le sorgenti laser

disponibili presso il CIRTIBS, durante lo svolgimento dell'attività non è stata usata per operazioni di taglio.

Le principali caratteristiche tecniche della sorgente sono riassunte in tabella 5.

Tabella 5: caratteristiche tecniche delle sorgenti Lasit FlyAIR 10.

Specifiche tecniche	FlyAir 10
Modo	TEM ₀₀
Lunghezza d'onda (nm)	1064
Potenza Media (W)	10
Durata dell'impulso (ns)	25
Frequenza di ripetizione (kHz)	10-100
Distanza focale (mm)	160
Diametro spot (μm)	circa 80
Area di marcatura (mm x mm)	99 x 99

3.4. Sistemi laser IPG

3.4.1. FiberPlus 30

L'apparecchiatura è composta da una sorgente laser della IPG YLP-RA SERIES e da una testa per la movimentazione del fascio di tipo *galvanometrico* (prodotto da Lasit).

Il FlyFiberPlus è una sorgente laser in fibra Yb:YAG di ultimissima generazione in grado di erogare una potenza media (costante) di 30 W e di generare un fascio con una lunghezza d'onda di 1.060 μm. Il regime di funzionamento è impulsato, con frequenza variabile tra 30 e 80 kHz.

La sorgente è inoltre dotata di un compressore d'impulsi che permette l'ottenimento di impulsi di durata ultrabreve (tipicamente 50 ns).

Una volta generato il fascio viene prima espanso con un beam expander e poi indirizzato verso gli specchi galvanometrici per la movimentazione. A valle degli specchi è posizionata la lente di focalizzazione in grado di ridurre il diametro del fascio (nel punto focale) ad 80÷100 μm.

Il laser eroga una potenza media costante il cui valore dipende esclusivamente dalla corrente di alimentazione dei diodi. Il secondo parametro variabile è la frequenza di ripetizione che permette di agire sull'energia di impulso e sulla potenza di picco.

Gli andamenti successivi rappresentano la variazione dell'energia di impulso (fig. 11) e della potenza di picco (fig. 12) in funzione della frequenza di ripetizione degli impulsi,

per quattro valori dell'intensità di corrente di alimentazione dei diodi (espressa in percentuale della massima corrente).

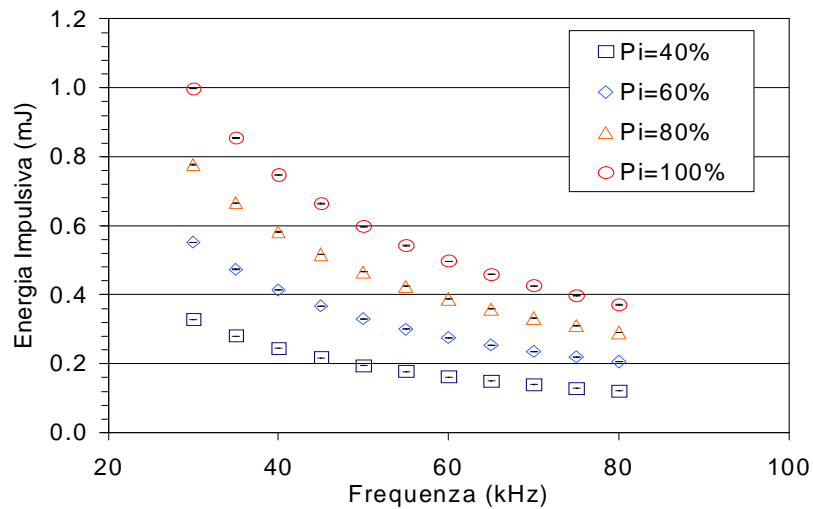


Figura 11: Energia impulsiva in funzione della frequenza di ripetizione degli impulsi per quattro valori di corrente ai diodi.

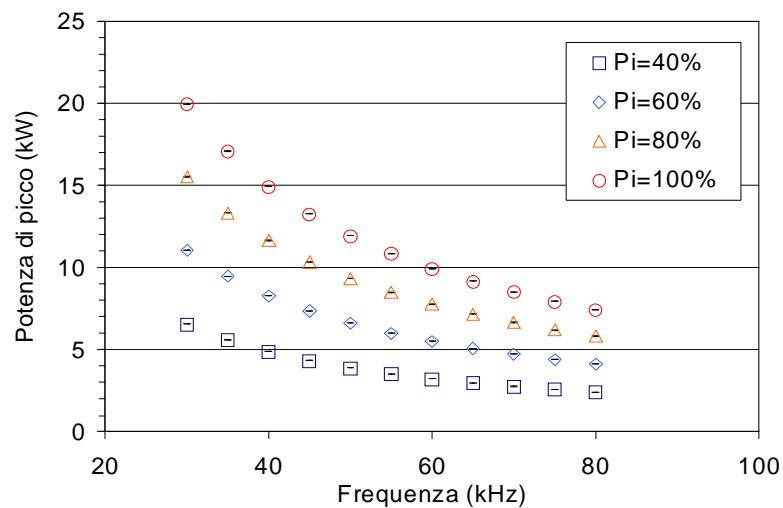


Figura 12: Potenza di picco in funzione della frequenza di ripetizione degli impulsi per quattro valori di corrente ai diodi.

Il sistema di movimentazione galvanometrico e la lente focale da 163 mm permettono di ricoprire un'area di lavorazione di 99 mm x 99 mm. Il sistema di focalizzazione è identico a quello della sorgente FlyAir 10 (a linea e punto).

Anche in questo caso, la zona di lavoro è rinchiusa in un box di sicurezza (fig. 10) dotato di blocco di emergenza, blocco istantaneo all'apertura delle porte, videocamera di controllo e sistema di aspirazione fumi.

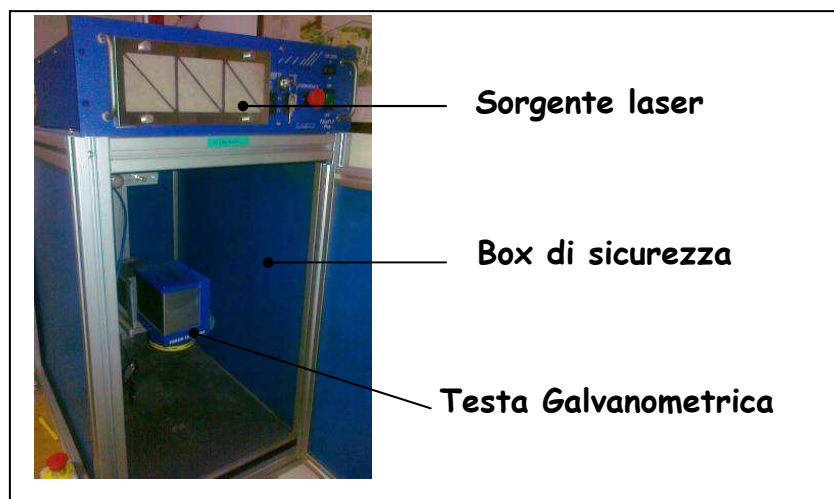


Figura 13: IPG FiberFlyPlus.

Nel seguito vengono riassunte le principali caratteristiche della sorgente laser usata.

Tabella 6: specifiche tecniche della sorgente IPG FlyFiberPlus 30.

Specifiche tecniche	IPG-Fly Fiber Plus 30
Materiale attivo	Yb:YAG
Modo	TEM ₀₀
Pompaggio ottico	A diodi
Massima potenza nominale	30 W
Diametro spot focale minimo (dichiarato)	80 µm
Durata impulso	50 ns
Frequenza di ripetizione impulsi	30 kHz-80 kHz
Linea elettrica	220V-230V
Potenza massima assorbita dalla rete	????
Raffreddamento	Ad aria forzata

Il software di gestione è il FlyCAD[®] che fornisce lo strumento per disegnare la geometria da dover realizzare, oltre al controller per la gestione della movimentazione e dei parametri energetici da usare durante la lavorazione. Anche in questo caso è possibile settare velocità di scansione, numero di ripetizioni e percentuale di potenza erogabile (convertita in corrente di alimentazione del sistema di pompaggio energetico).

3.4.2. DLR-200

La sorgente laser IPG (mod. DLR-200-AC) è in grado di erogare una potenza massima di 200 W ed emette un fascio laser alla lunghezza di 975 nm. Essendo una sorgente a diodi, la modalità di funzionamento caratteristica è in regime continuo, mentre il regime

impulsato può essere “simulato” agendo sulla tensione di alimentazione dei diodi (si parla in questo caso di regime modulato). Il fascio in uscita dalla sorgente è trasportato per mezzo di fibra ottica verso un collimatore che ne fissa il diametro a circa 6 mm. In fig. 14 si riporta un’immagine del collimatore ed una della sorgente.

È una sorgente estremamente robusta, con possibilità di gestione o da display frontale oppure tramite porta RS 232. Grazie al raffreddamento ad aria, è anche molto compatta contenuta in un racks facilmente integrabile.



Figura 14: Sorgente IPG DLR-200 con particolare del collimatore.

Posizionando il collimatore in alloggi opportunamente costruiti, grazie alla versatilità del trasporto in fibra, la sorgente DLR-200 può sfruttare due tipi di movimentazione: una galvanometrica (testa di scansione e software di controllo Lasit) ed uno cartesiano (CNC StarSystem Universal).

Tramite l’adozione di una lente di focalizzazione, montata a valle del collimatore è possibile ridurre ulteriormente il diametro del fascio, ma comunque le dimensioni raggiunte (nell’ordine del mm) non rendono questa sorgente adatta ad operazioni di taglio, anche di materiali polimerici.

Tuttavia, come dimostrato dalla letteratura, le sorgenti a diodi costituiscono un validissimo strumento nella lavorazione di materiali polimerici, in operazioni di saldatura, bonding, edging permettendo così di aprire, in tale sede, un’ulteriore filone di ricerca particolarmente attuale.

3.5. Strumenti di analisi e misura

Al fine di ottenere informazioni sulle caratteristiche geometriche e sulla qualità del sentiero di taglio, tutti i campioni realizzati sono stati sottoposti ad analisi ottica.

Gli strumenti di osservazione principalmente utilizzati sono stati due:

- Microscopio ottico AXIOSKOP 40-POL della ZEISS;
- Microscopio STEMI 2000/CS della ZEISS.

I due strumenti si differenziano sia per il massimo ingrandimento utilizzabile che per il sistema di illuminazione utilizzato.

Il primo consente ingrandimenti compresi tra 5X e 50X tramite una serie di obiettivi montati su una torretta a *revolver*. L'oggetto in osservazione viene illuminato da una luce prodotta da una sorgente ad incandescenza ad elevata intensità e concentrata sul piano porta campioni tramite dei *diaframmi* ed un *condensatore*. La direzione di illuminazione è fissa, in direzione coassiale a quella di osservazione e perpendicolare al piano porta-campione. Lo strumento è dotato di una serie di filtri utilizzabili per modificare la lunghezza d'onda della luce incidente sul campione in osservazione per migliorare eventualmente la risoluzione dell'immagine.

Il microscopio STEMI 2000/CS, invece, è dotato di illuminatori movibili in fibra ottica, di intensità luminosa regolabile in modo tale da garantire una corretta illuminazione su campioni di qualsiasi geometria e finitura superficiale; consente ingrandimenti decisamente più ridotti (max 5X) ma è equipaggiato con un piano di movimentazione X-Y collegato a sua volta con un sistema di misurazione digitale Quadra Check 200 che permette una misura diretta ed estremamente accurata della specifica grandezza in esame (larghezza del sentiero di taglio, Zona Termicamente Alterata, ecc.).

Entrambi i sistemi sono dotati di una sede per l'inserimento di una fotocamera digitale e/o videocamera per l'acquisizione diretta di immagini. Nello specifico sono stati utilizzati due sistemi di cattura quali fotocamera NIKON E4500 e videocamera MotiCam 1000.

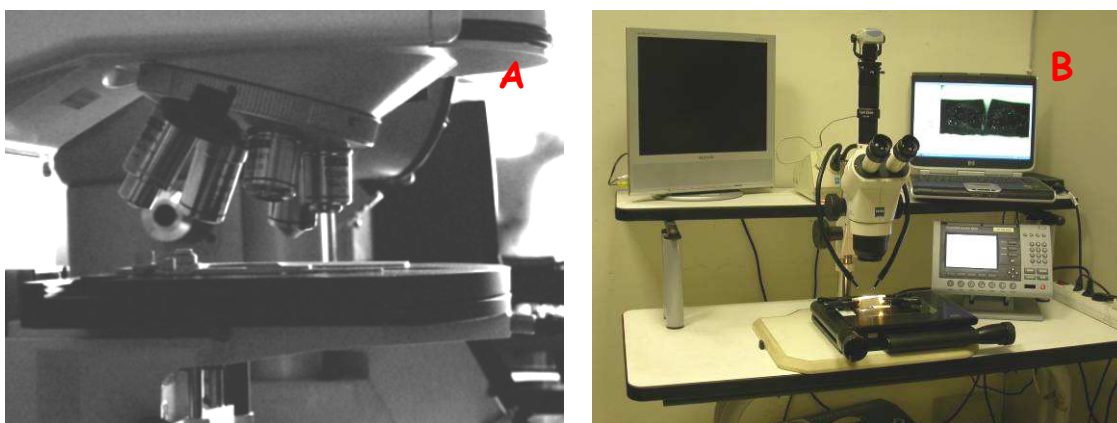


Figura 15: postazioni di misura: particolare del microscopio ottico (A); postazione di misura STEMI 2000/CS con misuratore Quadra Check 200 (B).

Le immagini così acquisite possono essere ulteriormente analizzate tramite il software MOTIC Image Plus 2.0 che fornisce un ulteriore strumento di misura per tutte le caratteristiche di interesse.

CAPITOLO 4

Applicazioni studiate

4.1. Introduzione

Nel seguente capitolo si riportano alcuni dei risultati conseguiti nei tre anni di ricerca in lavorazioni di taglio, svolti presso il CIRTIBS, riportando qualche accenno ed importanti considerazioni su operazioni di marcatura ed engraving realizzate con le stesse sorgenti (ampiamente descritte nel capitolo 3).

Il taglio laser è ormai una tecnologia ben consolidata a livello industriale per la lavorazione di materiali metalli anche se l'attuale livello tecnologico raggiunto dalle sorgenti laser ha consentito di estenderne il campo di applicazione, ampliando decisamente i materiali lavorabili.

Come già osservato in precedenza, i vantaggi offerti sono molti, ma essendo quello laser comunque un processo di tipo termico, porterà ad una alterazione del materiale nella zona lavorata, causando così un decremento della qualità della lavorazione. Una giusta analisi della modalità di interazione permetterà di ridurre l'estensione della zona termicamente alterata e di altri difetti tipici del taglio laser.

La possibilità di disporre di differenti sorgenti laser ha permesso l'analisi del comportamento di un'ampia gamma di materiali. Infatti, l'interazione tra fascio laser e materiale è fortemente influenzata dal coefficiente di assorbimento che dipenderà, a sua volta, dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente.

Sfruttando tale principio, è stata pianificata una lunga attività sperimentale mirata a determinare quale fosse la sorgente più adatta al taglio dei materiali studiati; ossia di:

- materiali organici (legno, cuoio e pelle conciata);
- materiali ceramici (pietre sintetiche, pietre naturali, silicio);
- materiali polimeri (PMMA, Polietilene, Polipropilene, ABS);
- materiali compositi (CFRP).

Inoltre, poiché la maggior parte delle sorgenti usate sono dotate di sistema di movimentazione di tipo galvanometrico, è stata valutata anche la possibilità di usare questo sistema in operazioni di taglio.

I risultati ottenuti hanno comunque dimostrato che questo sistema di movimentazione, tipico delle stazioni dedicate alle lavorazioni di marcatura ed engraving, è in grado di apportare diversi vantaggi rispetto alle configurazioni comunemente usate per le macchine da taglio (movimentazioni di tipo cartesiano).

Le velocità di scansione raggiungibili con gli specchi galvanometrici sono molte elevate (in alcuni casi sino a 10 m/s) e permettono di ottenere un'elevata produttività. L'assenza di una testa di taglio convenzionale (che utilizza un getto di gas coassiale al fascio, ad elevata pressione) non permette di impiegare gas di assistenza ma al più permette la presenza di gas di copertura nella zona lavorata, trasportato attraverso un sistema di alimentazione indipendente.

Tuttavia, le potenze più ridotte che caratterizzano queste configurazioni hanno obbligato il ricorso ad una tecnica di taglio per multi-passata rendendo particolarmente laboriosa la lavorazione di elevati spessori (soprattutto per i materiali metallici) anche perché l'assenza del gas d'assistenza evita l'allontanamento del materiale vaporizzato dal sentiero di taglio.

I materiali lavorabili con questa tecnica, infatti, sono quelli per cui l'energia fornita è tale da permettere la vaporizzazione istantanea del materiale che può così fuoriuscire facilmente dal sentiero di taglio, permettendo la lavorazione dello strato sottostante.

Ogni campione è stato sottoposto ad analisi ottica ed, in alcuni casi specifici, ad analisi al microscopio elettronico.

4.2. Materiali trattati

4.2.1 Materiali organici

L'utilizzo della tecnologia laser nel taglio di materiali organici, come legno, pelle conciata e cuoio è in rapida diffusione in virtù dei diversi vantaggi che questa tecnologia può offrire rispetto a quelle convenzionali

Ad esempio, il vantaggio del taglio laser è legato, per il legno, all'assenza di truciolo ed al fatto che il taglio avviene ad un livello di rumorosità estremamente contenuto.

Ovviamente gli spessori tagliabili sono limitati dalle potenze in gioco, che comunque consentendo al laser di trovare facile impiego nel taglio e sagomatura di pannelli.

Nel settore dell'industria conciaria, invece, il laser ha ancora una diffusione estremamente limitata nel taglio di pelle conciata e cuoio che rimane, nella maggior parte dei casi, una lavorazione di tipo manuale.

Tuttavia, molti autori hanno evidenziato la presenza di diversi inconvenienti dovuti essenzialmente alla struttura non omogenea dei materiali in questione ed alla sorgente impiegata (tipicamente CO₂).

I materiali legnosi, infatti, hanno una struttura fibrosa, caratterizzata da fibre di dimensione e densità differenti, che interagiranno in differenti modi con il raggio laser, complicando l'ottenimento di una superficie lavorata o di una buona definizione della forma del pezzo. Le pigmentazioni coloranti, la presenza di un rivestimento e la sua natura (film polimerico, metallizzante, ecc.), la disuniformità e la disomogeneità sono tutte variabili aggiuntive che complicano la definizione di un modello comportamentale, universalmente valido per tutte le pelli conciate.

Le dimensioni dello spot di focalizzazione (di norma superiori ai 250 µm) e la difficoltà di gestire la modalità di interazione sono i principali problemi osservati con questo tipo di sorgenti.

Seppur le larghezze del sentiero di taglio siano limitate alle centinaia di micrometri (contro i diversi millimetri ottenuti con utensili convenzionali di tagli), una sorgente CO₂ mal si presta alla realizzazione di geometrie particolarmente complesse e di ridotte dimensioni. Inoltre, il sentiero di taglio è spesso caratterizzato da vistose bruciature ed inoltre la formazione di fumi durante il processo può sporcare le superfici adiacenti alla zona interessata, compromettendo la qualità della lavorazione. Questi problemi vanno ad accentuarsi maggiormente nella lavorazione della pelle conciata e del cuoio, soprattutto per i materiali più delicati e per gli spessori più ridotti.

A tale scopo, sfruttando le informazioni acquisite sulla modalità di interazione tra fascio laser e materiale durante studi inerenti operazioni di marcatura e laser-engraving [8, 9], si è cercato di trasferire l'esperienza acquisita al processo di taglio proponendo, tra l'altro, le sorgenti Q-Switched Nd:YAG con lunghezza d'onda del fascio generato pari a 0.532 µm (seconda armonica) come valida alternativa alle sorgenti CO₂.

Queste sorgenti presentano il vantaggio di generare un fascio ben assorbito dai materiali organici, uno spot più piccolo ($\approx 80 \mu\text{m}$), tempi di interazione molto più ridotti che consentono l'ottenimento di elevate potenza impulsive.

Queste caratteristiche permettono una maggiore regolazione della modalità di interazione e rendono questi laser particolarmente adatti per il taglio di geometrie complesse e di dimensioni ridotte.

Un confronto immediato tra i livelli di definizione ottenibili con le due sorgenti è deducibile da una semplice decorazione realizzata su legno (fig. 1).

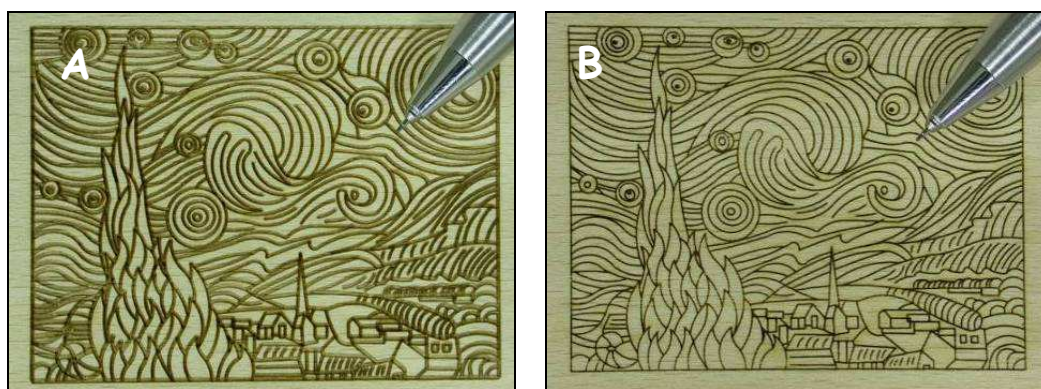


Figura 1: esempio di marcatura su legno (A: sorgente FlyCO₂; B:sorgente FlyGreen).

In figura 2 si riporta un esempio di taglio in multi passata su multistrato ligneo (spessore 4 mm) realizzato con la sorgente FlyCO₂. Fissati i parametri energetici (potenza e frequenza), velocità ridotte causano depositi di fumi generati dalla combustione che sporcano la superficie trattata. Il volume di materiale asportato è maggiore ed il lembo di taglio presenta una superficie annerita causata dal fenomeno di carbonizzazione. Un aumento di velocità è in grado di ridurre tutti questi effetti. Infatti un minore tempo di interazione (inversamente proporzionale alla velocità di taglio) evita la combustione ed il materiale verrà asportato essenzialmente per ablazione ed in maniera molto più graduale. Il numero di ripetizioni per garantire un taglio passante è maggiore anche se il tempo complessivo di lavorazione è minore. Nel caso nella sorgente a stato solido, la zona interessata dal taglio e l'entità della carbonizzazione è ancora più contenuta.

Tuttavia la bassa potenza erogata dalla sorgente disponibile non ha permesso di ottenere risultati soddisfacenti sul legno, ma la qualità nel taglio di pelli è sicuramente superiore (fig. 3).

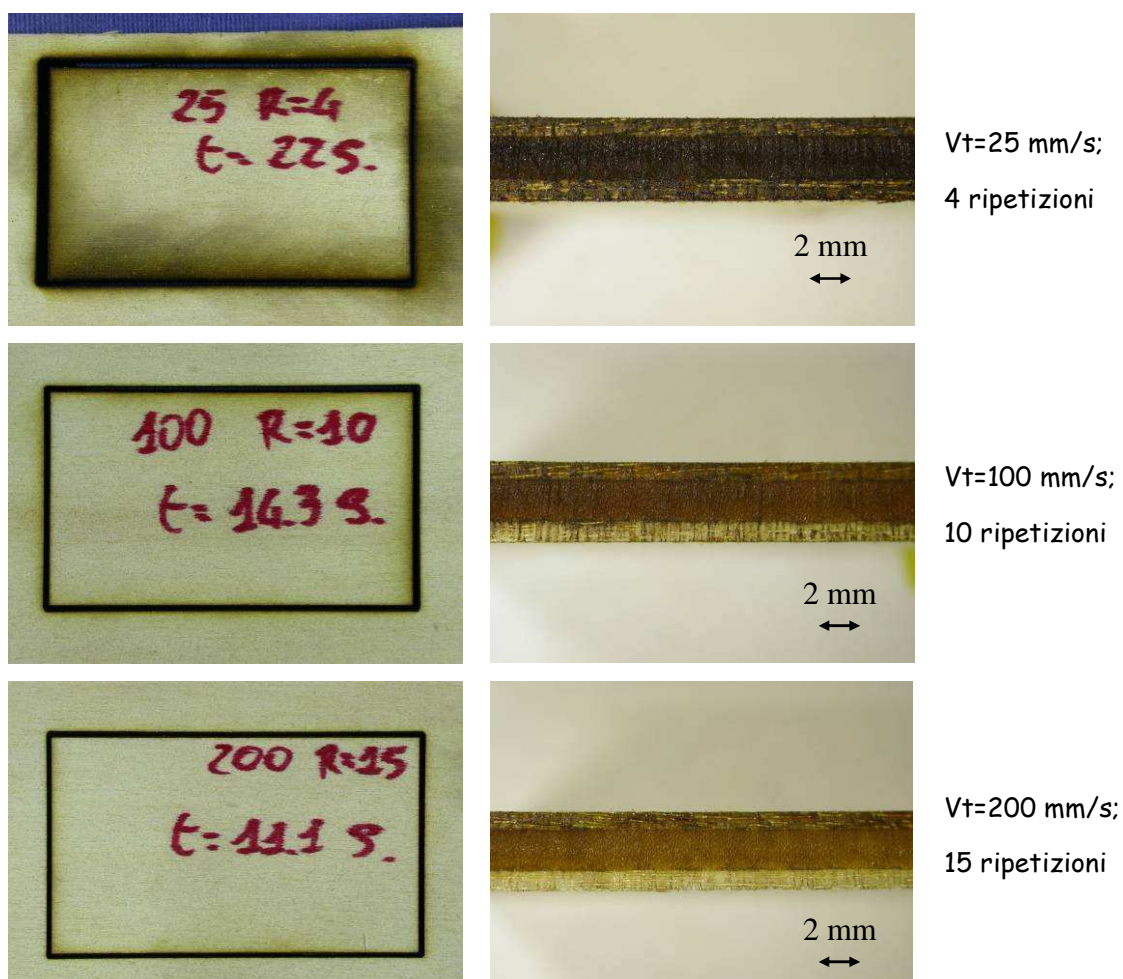


Figura 2: taglio laser di multistrato ligneo.



Figura 3: taglio laser di pelle conciata (sorgente Lasit FlyGreen).

Occorre comunque sottolineare che, fermo restando il principio fisico alla base dell'interazione, la scelta dei parametri che permettono di evitare la carbonizzazione è fortemente influenzata dalle caratteristiche del materiale.

Nel legno il parametro dominante è la densità che dipende fortemente dalla tipologia e dal grado di stagionatura, mentre nel cuoio e nella pelle è il processo di concia (tipologia di pelle, finitura superficiale, colore).

Tutto ciò rende molto complicata la definizione di un modello comportamentale (soprattutto per la pelle) universalmente valido e la conoscenza preventiva dell'effetto dei parametri energetici sulla qualità del taglio. Ciò, quindi, sarà possibile solo a valle di uno studio sulla modalità di interazione per ciascun pellame trattato.

Sulla base dei risultati conseguiti si può comunque affermare che le sorgenti laser a stato solido con lunghezza d'onda di emissione pari a $0.532\ \mu\text{m}$ sono una validissima alternativa alle sorgenti CO_2 nella lavorazione di materiali organici quale la pelle conciata ed il cuoio. L'uso di sorgenti Nd:YAG-Green di adeguata potenza permetterebbe, inoltre, l'inserimento di queste stazioni in cicli produttivi che permettano contemporaneamente operazioni sia taglio che di marcatura e/o di engraving con un notevole incremento qualitativo per entrambe le operazioni. Un ciclo del genere sarebbe infatti in grado di garantire elevatissimi gradi di precisione (caratteristica peculiare di qualsiasi sistema CNC) con un notevole risparmio di manodopera e materiale, oltre che del tempo di realizzazione. I ridotti spessori trattabili (nell'ordine dei mm) ne circoscriverebbero comunque l'inserimento in ambiti molti particolari come, per esempio, nell'industria calzaturiera e nella realizzazione di elementi decorativi in legno.

4.2.2 Materiali ceramici

Le tecnologie generalmente utilizzate per la lavorazione dei materiali ceramici pongono dei limiti fondamentali legate alle tolleranze dimensionali, alla qualità della lavorazione ed alle velocità di processo. I processi di lavorazione meccanica, per di più, aggiungono ulteriori problematiche quali usura degli utensili e problematiche connesse con lo smaltimento dei fluidi refrigeranti e abrasivi (usati, ad esempio, nel taglio con sega circolare e filo diamantato). Lo stress meccanico indotto dall'azione degli utensili, poi, causa la formazione di cricche che propagandosi nel materiale possono portare alla frattura del componente stesso.

Un esempio tipico sono i wafer di silicio materiale molto duro ed estremamente fragile la cui applicazione è particolarmente diffusa nel settore micro-meccanico, ottico, opto-

elettronico ed elettronico. La miniaturizzazione dei componenti, poi, spinge alla ricerca di nuove tecnologie di fabbricazione che comunque riescano a ridurre le tolleranze dimensionali ma anche i costi di produzione.

Al fine di approfondire quali possano essere i vantaggi ottenibili nella lavorazione dei wafer di silicio tramite laser impulsati [10,11], è stata approntata una campagna sperimentale durante la quale utilizzando la stazione di taglio Rofin si è provveduto alla caratterizzazione del processo di taglio di wafer di silicio dello spessore di 0,75 mm.

Il lavoro è stato sviluppato realizzando tagli a singola passata (fig. 4) a differenti condizioni operative (settando sulla sorgente frequenza di ripetizione, durata dell'impulso e velocità di taglio) ed analizzando le geometrie dei sentieri realizzati, evidenziando forme e difetti al variare dei parametri di lavorazione.

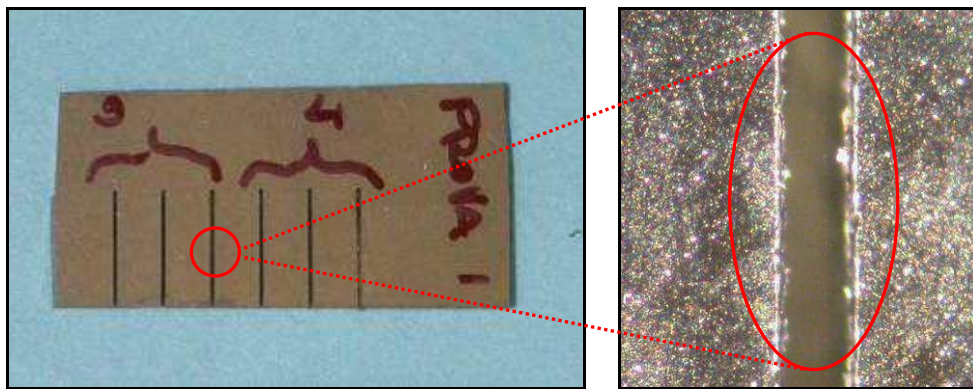


Figura 4: tagli su wafer di silicio in differenti condizioni operative.

L'analisi condotta ha permesso di stabilire quale fosse la velocità di taglio massima raggiungibile al variare della potenza media erogata dalla sorgente andando così a scartare, dall'analisi successiva, tutte quelle condizioni che non fossero in grado di permettere la realizzazione di un taglio passante.

Le quantità geometriche analizzate state:

- larghezza del sentiero di taglio dal lato d'ingresso;
- larghezza del sentiero di taglio dal lato d'uscita;
- angolo di inclinazione delle superfici del sentiero di taglio.

I risultati ottenuti [12] hanno dimostrato una dipendenza pressoché lineare tra la velocità raggiungibile e la potenza media erogata. Con una potenza relativamente modesta (circa

100 W) è possibile ottenere velocità di lavoro di circa 14 mm/s, mantenendo la larghezza del sentiero di taglio nell'ordine delle centinaia di micron (comprese tra i 200 e 250 μm).

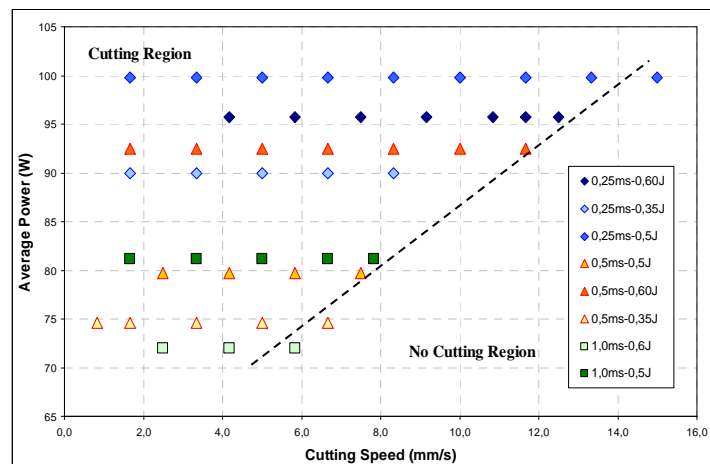


Figura 5: variazione della velocità di taglio in funzione della potenza media erogata, per tre diverse durate dell'impulso.

La larghezza superiore del sentiero di taglio, inoltre, risulta essere praticamente costante al variare del fattore di ricopertura e caratterizzata da una dispersione molto contenuta al variare degli altri parametri energetici. Analogo discorso può essere fatto per la larghezza inferiore del sentiero di taglio, anche se la dispersione dei dati è maggiore (fig. 6).

Per le condizioni a bassa velocità e ridotta potenza media la larghezza inferiore assume valori più elevati della larghezza superiore e ciò si ripercuote sull'angolo di conicità, valutato come descritto nel capitolo 2.

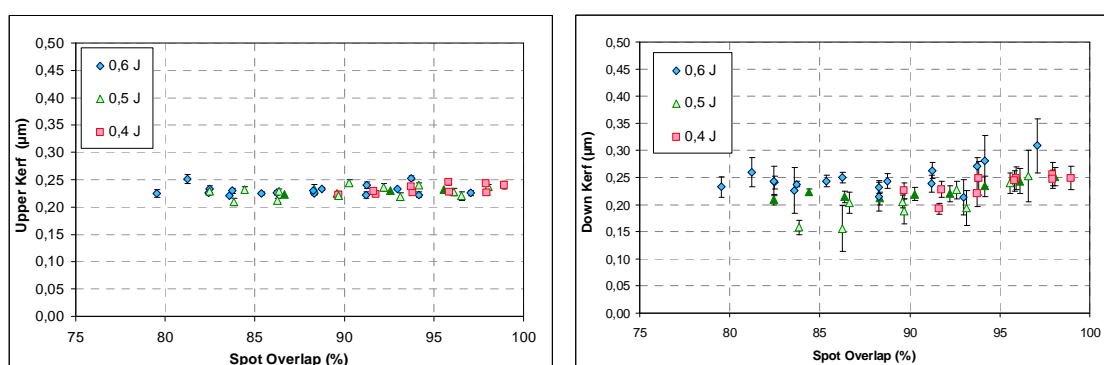


Figura 6: variazione della larghezza del sentiero di taglio al variare del fattore di ricopertura.

Come riportato in fig. 7, l'angolo è molto piccolo con valori compresi tra $\pm 2,5^\circ$. Tuttavia, essendo lo spessore del wafer di 0,75 mm, questo risulta troppo piccolo per permettere di osservare angoli di una certa entità, rendendo così la misurazione particolarmente difficile. Un aumento del fattore di ricopertura favorisce il passaggio da

valori positivi a valori negativi dell'angolo di conicità che si traduce in una variazione della sezione del sentiero di taglio come visibile in fig. 8.

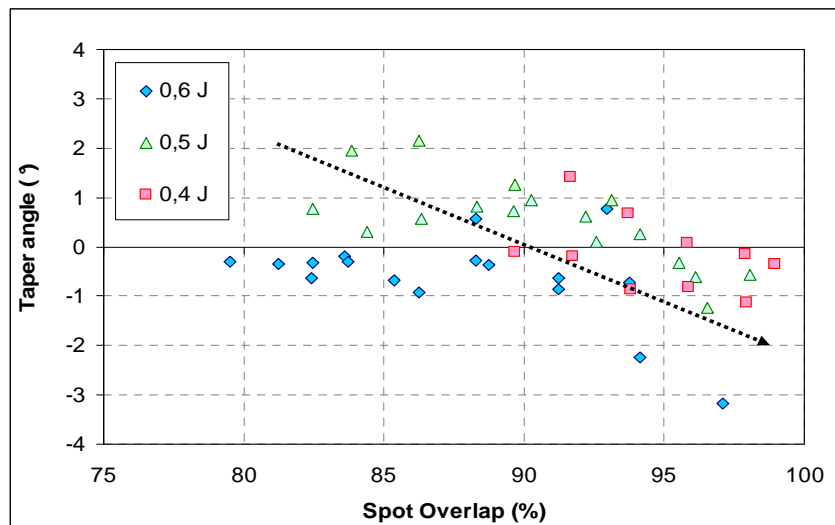


Figura 7: variazione dell'angolo di conicità con il fattore di ricopertura.

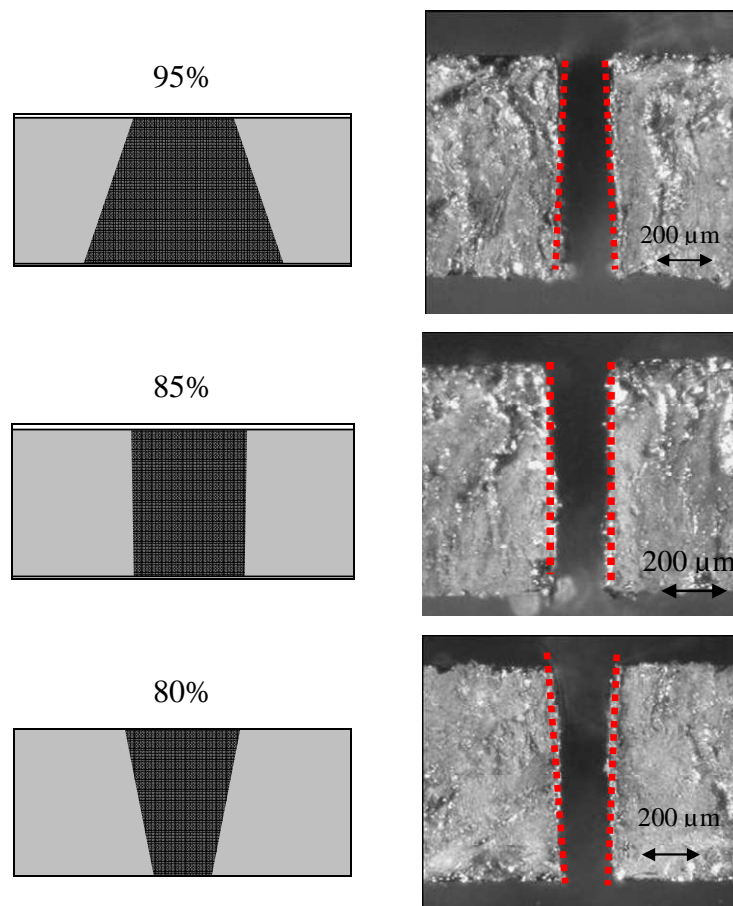


Figura 8: sezione del sentiero di taglio per diversi R%.

Relativamente ai difetti riscontrabili, l'attenzione è stata focalizzata su:

- Presenza di cricche lungo le superfici laterali del sentiero di taglio;
- Presenza di bava (sia dal lato d'ingresso che dal lato d'uscita).

L'analisi ha rilevato che al variare della velocità i bordi di taglio nella zona di ingresso si mantengono molto regolari e puliti (con ridottissima quantità di bava e quasi completa assenza di microfratture). Le irregolarità del bordo di uscita, pur aumentando al diminuire della velocità di lavorazione, si mantengono comunque molto contenute e sono costituite da materiale espulso dal kerf e risolidificato lungo i bordi.

Per studiare più nel dettaglio quale sia l'alterazione che il materiale subisce nella zona lavorata all'analisi ottica è stata affiancata un'analisi al microscopio elettronico a scansione (*SEM*). La presenza di microcricche è stata osservata solo raramente e, comunque, sembra sia limitata al solo materiale risolidificato sulla superficie.

In fig. 9 è messo in evidenza l'ottima qualità dello spigolo del bordo d'ingresso e la presenza di piccole particelle di materiale risolidificato sul bordo inferiore.

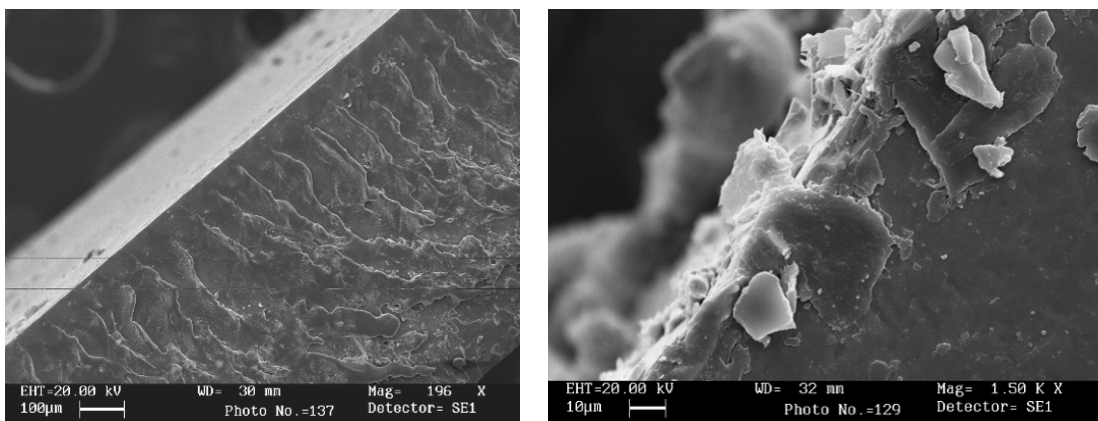


Figura 9: Immagini al SEM dei campioni in silicio.

I vantaggi apportati dalla tecnologia laser nella lavorazione di materiali ceramici sono risultati particolarmente evidenti anche in altri tipi di lavorazione, come ad esempio nella foratura.

A tale scopo è stata testata la possibilità di realizzare una serie di fori di diametro particolarmente ridotto (circa 1.5 mm) su componente in ossido di zirconio, stabilizzato con ittrio (Y-TZP) per applicazioni aerospaziali.

La lavorazione meccanica di un componente di questo tipo, infatti, ha presentato diversi inconvenienti primo tra tutti l'eccessiva usura dell'utensile (punta diamantata o in acciaio speciale) causata dall'eccessiva durezza del materiale e la velocità di foratura particolarmente ridotta. Inoltre, le tensioni che nascono in seguito all'azione meccanica

dell'utensile in aree di così ridotte dimensione, portano alla formazione di cricche che propagandosi nel bulk di materiale, ne determinano facilmente la rottura.

La foratura laser rappresenta un processo alternativo potenzialmente in grado di offrire tempi di lavorazione molto più rapidi e di evitare problemi di usura degli utensili. Dall'altro canto, l'elevato coefficiente di dilatazione termica ($10.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) ed il cambiamento di fase a cui è soggetto localmente, durante la lavorazione, può causare la formazione elevate tensioni interne ed il conseguente insorgere di fenomeni di *crack propagation* con la conseguente rottura del componente [18].

Traendo spunto dagli studi presenti in letteratura [14-16], sorgenti laser ad impulsi brevi (nanosecondi o meno), unitamente ad elevate frequenze di ripetizione possono ridurre questi inconvenienti: elevati valori di energia impulsiva, rilasciata in tempi così brevi sono in grado di determinare la vaporizzazione istantanea del materiale riducendo così lo stress termico sul pezzo.

I fori sul componente in questione sono stati realizzati tramite la sorgente IPG-FlyFiberPlus sfruttando una modalità di foratura in multi-passata del tutto analoga a quella adoperata per il taglio in multipassata (da cui l'accostamento tra la lavorazione di taglio e di foratura).

Mantenendo costante la potenza media erogata (30 W) ed il numero di passate, è stata modificata la velocità di scansione e la frequenza di ripetizione, per valutarne l'effetto sulla qualità del foro.

Durante la lavorazione, sul pezzo è stata continuamente inviata una corrente d'aria compressa (circa 5 bar). Il getto d'aria ha avuto il duplice scopo di contenere l'innalzamento di temperatura del componente e di favorire l'allontanamento del materiale vaporizzato dal fascio laser. Tramite una termocoppia inserita all'interno del componente, si è potuto verificare come la temperatura del monolita durante la lavorazione non superasse i 45°C .

Sottoponendo quindi i componenti ad analisi ottica, è stato possibile individuare la forma del foro e l'estensione delle cricche.

A causa delle caratteristiche intrinseche di messa a fuoco del processo laser, il diametro del foro di entrata è risultato di norma più grande del diametro del foro di uscita, dando così origine ad un angolo di conicità particolarmente accentuato. A causa dell'elevato spessore della parete da forare (4 mm), è stato quindi necessario ricorrere a continue

correzioni dello spot di focalizzazione, riuscendo a contenere la conicità del foro ($< 5^\circ$) (fig. 10-A).

La formazione di cricche è stato un altro problema affrontato. Un aumento della velocità di scansione unito ad un aumento della frequenza di ripetizione ha effettivamente ridotto la quantità di cricche formatesi (fig. 10-B), sin quasi alla totale scomparsa.

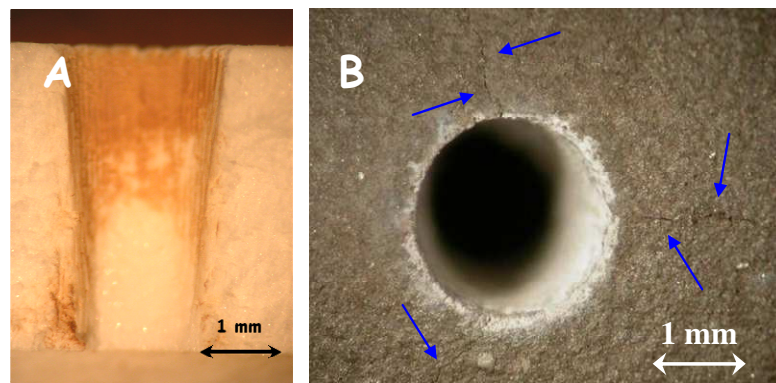


Figura 10: sezione del foro realizzato su Y-TZP (A); cricche formatesi durante il processo (B).

Nel seguito si riportano due immagini (fig. 11) del componente in questione in fase di lavorazione e del componente forato.

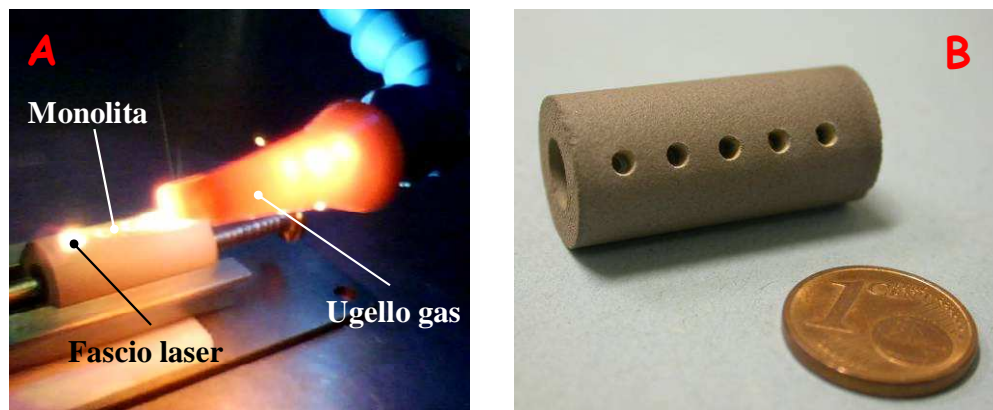


Figura 11: componente in Y-ZTP in fase di lavorazione (A) ed in seguito a foratura (B).

4.2.3 Materiali polimerici

I materiali polimerici ben si prestano ad essere lavorati tramite tecnologia laser, anche se il risultato è fortemente influenzato dalla lunghezza d'onda del fascio laser, dalla natura chimica del polimero e dagli additivi polimerici, primi tra tutti le cariche coloranti. Le varie sostanze commercialmente usate per colorare i polimeri, ad esempio,

risultano essere più o meno reattive alle diverse radiazioni dando così origine a meccanismi di interazioni diversi.

Diversi studi hanno dimostrato la validità delle sorgenti a stato solido Nd:YAG e delle sorgenti a diodi (con lunghezza d'emissione di 940-975 nm) nelle operazioni di saldatura, più propriamente definita *bonding*, di materiali termoplastici. In questo tipo di giunzione, il calore fornito dal fascio laser causa un rammollimento del materiale e l'applicazione di una forza esterna permette la diffusione delle macromolecole tra le parti da giuntare [17,18]. Sfruttando questo principio è possibile realizzare l'unione di materiali polimerici termoplastici anche con materiali diversi, come ad esempio metalli, senza l'ausilio di alcun adesivo [19].

Relativamente alle operazioni di taglio, le sorgenti a CO₂ sembrano essere quelle più valide per la maggior parte delle sostanze polimeriche commercialmente usate [20], mentre il coefficiente d'assorbimento alla lunghezza di 1,064 µm è molto più ridotto.

Anche il meccanismo di rimozione del materiale dipende dalla tipologia di polimero trattata. Per molti termoplastici il meccanismo predominante è quello di fusione, mentre per le resine termoindurenti ciò che avviene è essenzialmente un degrado chimico in cui l'energia fornita dal fascio laser determina la rottura dei legami atomici.

Il taglio dei polimeri acrilici (ad esempio PMMA) avviene per vaporizzazione con una velocità ed una qualità del lembo (in termini di HAZ e di rugosità) più elevate rispetto ad altri polimeri.

Risultati del tutto analoghi a quanto riportato in letteratura [21-22], sono stati ottenuti in una serie di prove iniziali mirate proprio ad ottimizzare i parametri di lavorazione nel processo di taglio laser di Plexiglass utilizzando la sorgente Fly CO₂.

Nel caso delle prove effettuate presso il CIRTIBS, la potenza media è stata fissata a 30W e 20W con frequenze di ripetizione di 2kHz, 15 kHz e CW. Al fine di garantire fattori di ricopertura almeno dell'80% (ovviamente per il funzionamento in regime impulsato) la velocità è variata tra 25mm/s e 1500 mm/s.

Da una serie di prove di penetrazione, i risultati ottenuti mostrano che la profondità e la larghezza del sentiero sono proporzionali al rapporto P/v che coincide con l'energia fornita per unità di lunghezza (fig. 12). Mentre la profondità aumenta in maniera lineare, la larghezza del sentiero cresce seguendo una legge logaritmica tendendo ad un valore costante per valori superiori a 0.6 J/mm.

Ciò agisce ovviamente sulla quantità totale di materiale asportato, ma ancora di più sulla forma in sezione del sentiero di taglio. La forma in sezione del sentiero è risultata essere generalmente a “V” ma con un rapporto di forma (profondità/larghezza) che tende ad aumentare all’aumentare di P/v (fig. 13).

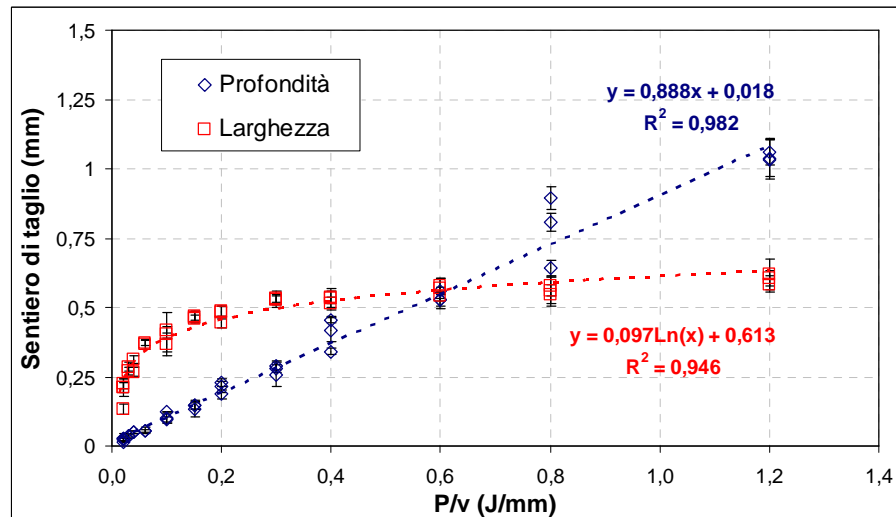


Figura 12: Larghezza e profondità del sentiero di taglio al variare del rapporto P/v .

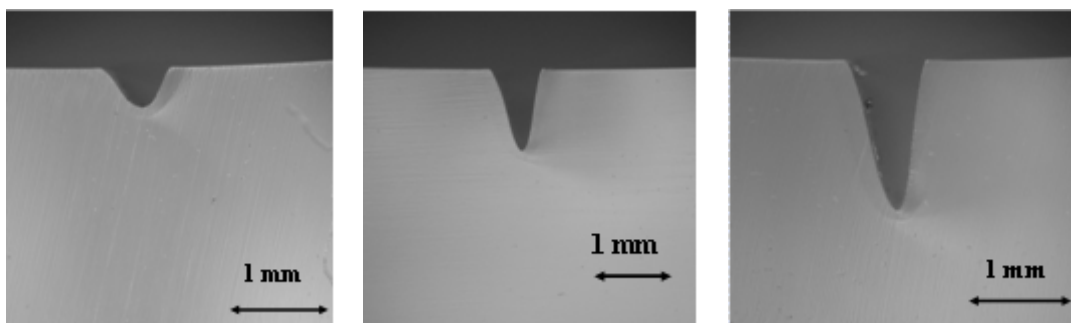


Figura 13: variazione della forma del sentiero all’aumentare del rapporto P/v (da sx verso dx).

Durante l’attività svolta nei tre anni, sono stati ottenuti ottimi risultati anche in operazioni di marcatura su diversi polimeri carichi e non. In particolare, sono stati scelti sia termoindurenti che termoplastici tra cui ABS, PoliPropilene, PoliEtilene, PoliCarbonato e PMMA. I risultati, come atteso, sono risultati alquanto variabili.

Ad esempio, la differente reattività del polipropilene neutro alle tre lunghezze d’onda usate ($0,532\ \mu\text{m}$, $1,064\ \mu\text{m}$, $10,6\ \mu\text{m}$) è risultata immediatamente evidente (fig. 14). Nel caso delle sorgenti FlyGreen e FlyAir 10 si realizza un degrado chimico del materiale, misto ad una pirolisi localizzata, la cui entità è correlata al coefficiente di assorbimento del materiale a quella particolare lunghezza d’onda. Mentre, il coefficiente di assorbimento più elevato alla radiazione generata dalla sorgente a CO_2 (tipico di questi

materiali a questa lunghezza d'onda), causa un rammollimento del polimero, privo di combustione ma comunque molto elevato, che non permette di ottenere l'adeguata definizione dei particolari.

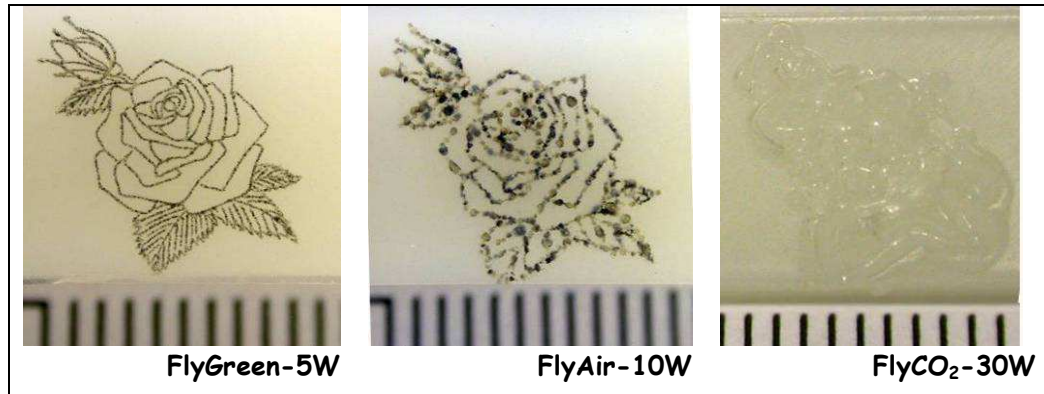


Figura 14: Decorazione su polipropilene neutro.

Analoghi risultati si sono avuti per l'ABS. Anche in questo caso, il materiale è risultato particolarmente reattivo alla radiazione di $1.064\ \mu\text{m}$ ed il colore ha ricoperto un ruolo sostanziale nel processo. Fissati i parametri energetici, alcuni colori non hanno reagito bene, poiché soggetti ad un degrado chimico molto accentuato in conseguenza del quale la definizione del disegno è risulta troppo bassa (fig. 15).

Per altri colori, invece, fissata la velocità di scansione, si passa da un meccanismo di *bleaching* (per le basse frequenze) ad un meccanismo di *foaming* (per le alte frequenze). Nel primo caso la decorazione risulta praticamente impalpabile mentre, nel secondo caso, è più percettibile al tatto (tipico del fenomeno di *schiumatura*).



Figura 15: Decorazione su ABS di diversi colori e diverse finiture superficiali, realizzate tramite la sorgente FlyAir 10.

Un secondo ed importante aspetto facilmente deducibile è che variando i parametri di lavorazione è possibile calibrare in maniera estremamente accurata la quantità di materiale asportata durante il taglio e quindi la profondità raggiungibile.

Questo aspetto può essere sfruttato quando, nel caso di un materiale multistrato, debbano essere lavorati solo gli strati superiori senza intaccare quelli inferiori oppure quando non sia necessario procedere alla completa separazione degli elementi ma realizzare un invito che favorisca il successivo distacco degli elementi.

Il primo caso trova particolare riscontro in alcuni processi industriali tra cui la fresatura chimica di metalli (*chemical milling*).

L'operazione di contornatura per la rimozione del maskant di protezione nella maggior parte dei casi, avviene manualmente oppure attraverso cutter a controllo numerico. In entrambi i casi si rischia l'incisione del metallo sottostante con una qualità di taglio che può compromettere le fasi successive di fresatura.

Per far fronte a tale esigenza è stato concepito un accurato studio mirato a ricercare quei parametri operativi (*lunghezza d'onda, potenza media e velocità di processo*) che permettessero di incidere (per poi asportare) lo strato polimerico (con spessore variabile tra i 250 μm e 300 μm) senza intaccare minimamente la lamina metallica sottostante.

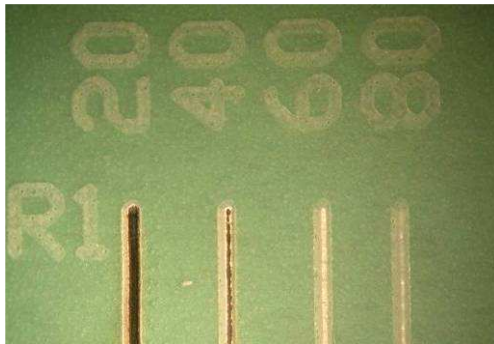
La sorgente laser a CO_2 , tra quelle impiegate, è risultata la più efficace sia in termini di velocità di processo che in termini di qualità del taglio [28]. Infatti, la sorgente CO_2 ha una lunghezza che, da un lato, è ben assorbita dal rivestimento polimerico con una efficacia maggiore rispetto alle radiazioni "*Red o green*", dall'altro è facilmente riflessa dal metallo, per cui si evita il danneggiamento della parte metallica sottostante.

Nelle figure 16 e 17 si riporta un confronto dei sentieri e delle sezioni ottenute con due sorgenti, rispettivamente CO_2 e Nd:YAG riportato alla II armonica (laser verde).

A causa della potenza ridotta la sorgente Fly Green non è in grado di raggiungere velocità accettabili, giustificandone magari l'applicazione là dove sia privilegiata l'elevata precisione e le dimensioni ridotte, piuttosto che la produttività. Infatti, l'uso di sorgenti Green più potenti è sconsigliabile sia per il maggior costo che per il minor rendimento (rispetto alle sorgenti Red e CO_2 di uguale potenza).

Concentrando quindi l'attenzione sulla sorgente CO_2 , l'analisi ha permesso di individuare cinque differenti tipi di incisioni, schematizzati in fig. 18 e di individuare, in funzione di potenza media e velocità, altrettante aree di lavoro. Dalla fig. 19 si evince che le aree di lavoro (indicate con le lettere di cui sopra) sono ben delimitate da curve di

tipo lineare e permettono di scegliere in maniera immediata la giusta combinazione di potenza e velocità in funzione del tipo di incisione desiderato.

LASER CO₂

LASER Nd:YAG-Green

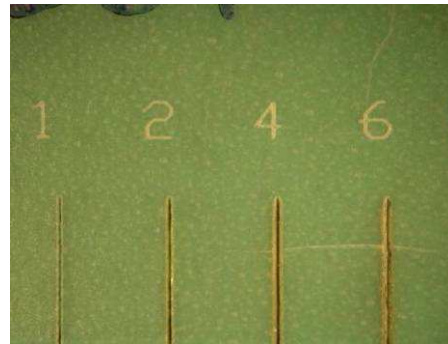
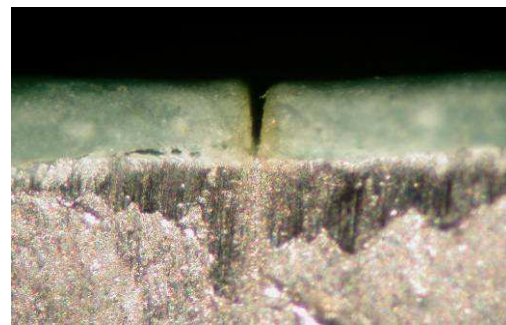


Figura 16: prove preliminari di incisione



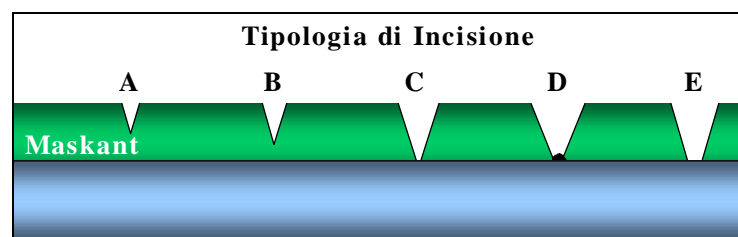
Velocità di taglio: 60 mm/sec.
Frequenza di ripetizione: CW.
Numero di ripetizioni: 1



Velocità di taglio: 15 mm/sec.
Frequenza di ripetizione: 6 kHz.
Numero di ripetizioni: 15

Figura 17: vista in sezione dei sentieri di incisione con i relativi parametri di lavorazione

Le condizioni di lavoro ottimali sono quelle indicate dall'area C per la quale nella successiva fase di stripping la pellicola non interessata direttamente dall'azione del fascio laser è rimasta perfettamente aderente alla superficie metallica (cosa che invece non accade nell'area indicata con B); inoltre la lamina di metallo non è stata minimamente interessata dal processo laser.



- A. incisione parziale;
- B. taglio incompleto del polimero (residuo sul metallo);
- C. taglio completo del polimero (senza residuo sul metallo);
- D. taglio con carbonizzazione del polimero;
- E. taglio con incisione dell'alluminio sottostante.

Figura 18: diverse tipologie di incisione riscontrate.

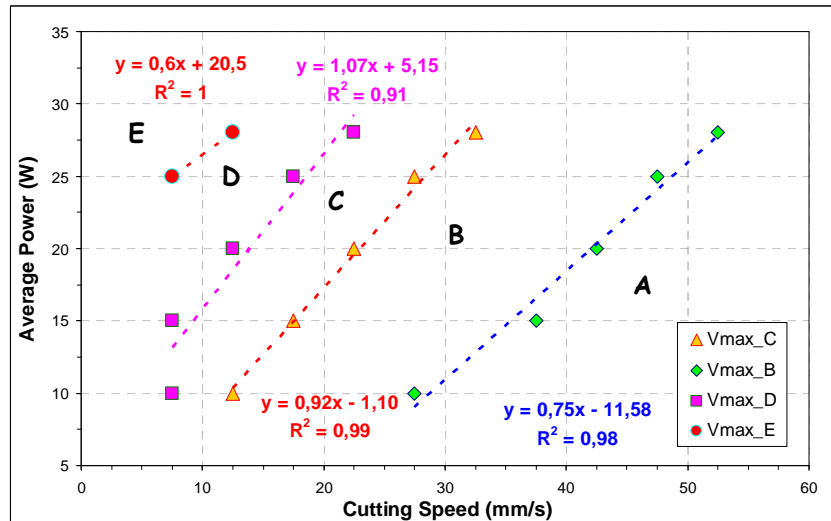


Figura 19: Potenza limite di taglio ed aree di funzionamento.

Nella figura 20 si riportano due immagini prima e dopo la fase di stripping. Nell'immagine superiore è chiaramente visibile l'incisione del metallo (condizione corrispondente all'area E); nell'immagine inferiore non c'è traccia di alterazione della superficie (condizione corrispondente all'area C).

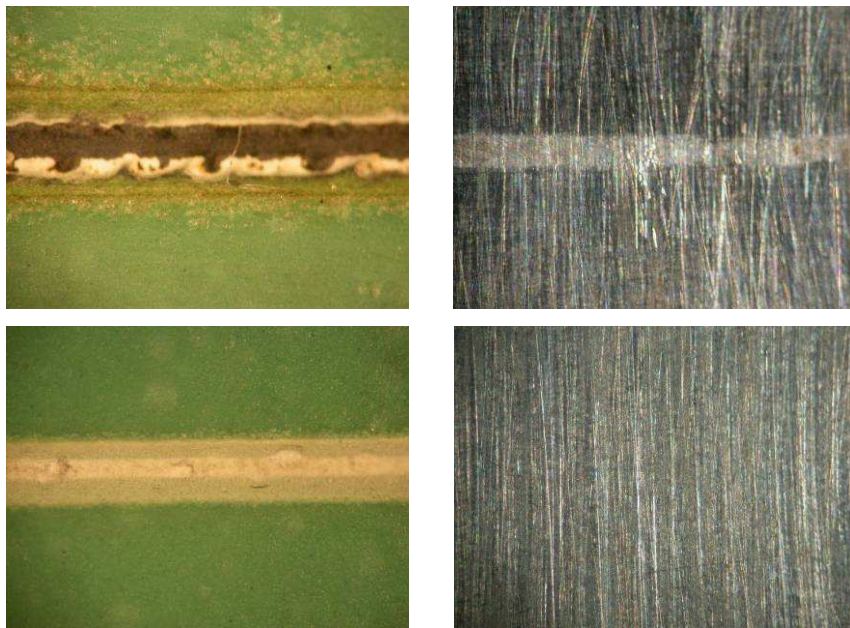


Figura 20: taglio maskant con e senza incisione del metallo sottostante.

Dall'analisi della geometria del sentiero di taglio, limitata alle sole condizioni in cui si ottiene una incisione completa del maskant (curva limite Vmax_C) è stato possibile osservare come esista una forte dipendenza della forma del sentiero sia dalla velocità che dalla potenza.

Sia la larghezza superiore del sentiero di taglio che l'angolo di conicità diminuiscono al diminuire sia della velocità che della potenza impiegata (fig. 21).

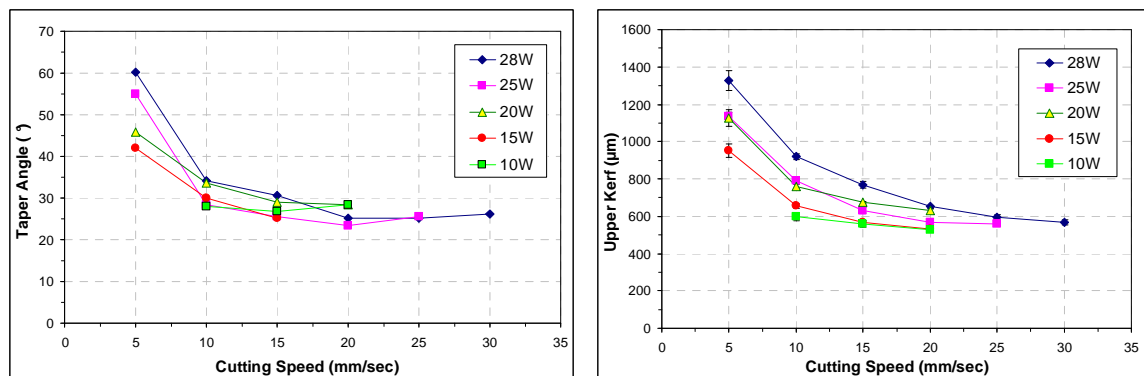


Figura 21: variazione dell'angolo di conicità e della larghezza del sentiero in funzione della velocità, per le diverse potenze impiegate.

Questo significa che, fissata la potenza erogata, l'utilizzo di una velocità elevata è conveniente poiché permette contemporaneamente una maggiore produttività, una forma del sentiero più regolare lungo lo spessore ed un volume asportato minore.

Una diminuzione di potenza comporta una ulteriore diminuzione del volume asportato anche se ciò causa una riduzione della velocità massima raggiungibile nel processo.

4.2.4 Materiali compositi

Durante l'attività sono stati sottoposti ad operazioni di taglio laminati composti da tessuto in fibra di carbonio e resina epossidica, comunemente definiti *Carbon Fiber Reinforced Plastic* (CFRP). Gli spessori trattati sono compresi tra 0.5 mm e 1.2 mm.

Le sorgenti laser usate sono state la StarCut 150 della Rofin e le sorgenti FlyRed 20 e FlyFiberPlus 30 che, come già visto nel capitolo precedente, generano fasci laser alla stessa lunghezza d'onda ma si differenziano per la potenza erogata e per l'architettura delle sorgenti.

Alle tre sorgenti corrispondono tre differenti modalità di rilascio dell'energia; dunque, durante questa fase è stata ricercata quale fosse la modalità di cessione dell'energia che fosse in grado di ridurre i difetti.

A seconda dello spessore, sono state adottate due distinte tecniche di taglio: a singola passata (per gli spessori maggiori) ed a multi passata (per gli spessori minori).

L'energia fornita dal laser causa la vaporizzazione del materiale, creando così il sentiero di taglio. Una parte significativa di energia verrà dissipata dalle fibre (a causa della loro elevata conducibilità) ed assorbita dalla matrice che andrà a degradarsi in una zona a ridosso del sentiero di taglio. Ciò è essenzialmente causato dalle ridotte caratteristiche termiche della matrice, la quale avrà una temperatura di vaporizzazione nettamente inferiore a quella delle fibre. In tal modo vengono a crearsi, sui pezzi finiti, una serie di difetti (*Zona Termicamente Alterata, Bridging, Pull Out, Delaminazione, Degrado Superficiale*), tipici di questo tipo di lavorazione che, come sempre, andranno a comprometterne la qualità.

Si è constatato quindi come una specifica energia impulsiva rilasciata in tempi estremamente ridotti (durate dell'impulso nell'ordine dei nano o millisecondi) sia in grado di vaporizzare istantaneamente il materiale (sia fibra che matrice) riducendo la quantità di calore assorbita dalla matrice e, di conseguenza, tutti i difetti associati, garantendo un sentiero di taglio netto e pulito. L'energia necessaria è a sua volta dipendente dallo spessore del materiale e dalla velocità di taglio richiesta.

Poiché l'energia impulsiva è comunque legata alla potenza erogabile dalla sorgente (tramite la frequenza di ripetizione degli impulsi), a seconda dello spessore da lavorare, è necessario disporre di sorgenti di potenza adeguata.

Proprio per questo motivo, a seconda dei parametri energetici impostati (in termini di frequenza e durata dell'impulso) l'energia erogata dalla StarCut (nell'ordine dei J) è risultata sufficiente a garantire il taglio dei laminati più spessi (1.2 mm) in una singola passata e, come verrà dettagliatamente illustrato nel capitolo 5, durate dell'impulso più brevi hanno effettivamente permesso di ridurre il degrado indotto sul materiale.

Nel caso delle sorgenti FlyRed 20 e FlyFiberPlus 30, a causa dei valori di energia erogati (nell'ordine dei mJ), per garantire un taglio passante è stato necessario ricorrere a più passate.

D'altro canto, essendo la durata dell'impulso di entrambe le sorgenti più breve rispetto alla StarCut (150 ns per la sorgente FlyRed 20 e 50 ns per la sorgente FlyFiberPlus 30), per quanto detto in precedenza il danno termico è risultato più contenuto (in alcuni casi quasi del tutto assente), ma affetto da un angolo di conicità elevato.

In figura 17 si riporta un confronto tra le viste in sezione dei sentieri di taglio, realizzati su due laminati di spessore differente 0.4 mm (sx) e 1.2 (dx), con due sorgenti Lasit FlyRed (sx) e Rofin StarCut 150 (dx).

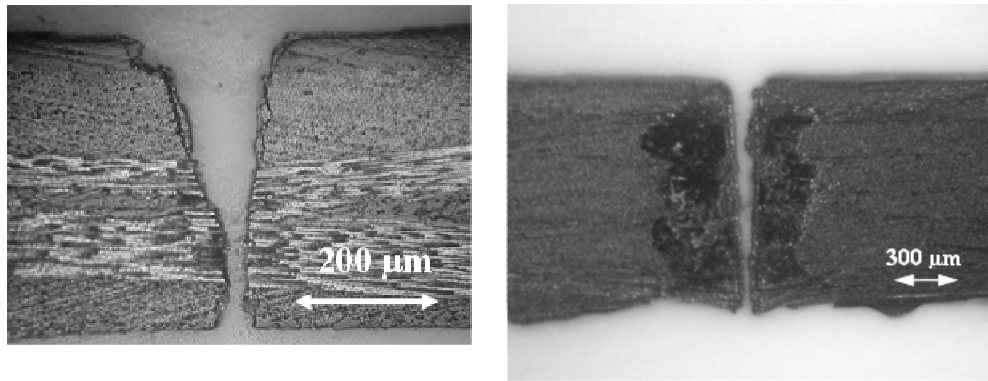


Figura 22: confronto tra le due sezioni di taglio.

Il processo di taglio è risultato più lento con le sorgenti FlyRed 20 e FlyFiberPlus 30; quindi allo stato attuale, ci si è limitati al taglio dei lamierini più sottili.

I laser ai nanosecondi sono una valida alternativa nelle operazione di taglio dei CFRP di piccolo spessore con i quali è possibile contenere decisamente il degrado termico indotto sia in termini di HAZ che di degrado superficiale.

Conviene sottolineare che oggi giorno sta nascendo nel settore dell'oggettistica e dell'accessoristica un nutrito interesse per i materiali compositi in fibra di carbonio. In questi settori quindi il danno estetico dovuto al degrado termico superficiale è particolarmente sentito. I vantaggi apportati sono facilmente riscontrabili soprattutto nel taglio di geometrie complesse (fig. 23).



Figura 23: taglio di carboresina: spessore 0.4 mm con la sorgente FlyRed 20.

4.3 Conclusioni

La tabella 1, fornisce delle utilissime linee guida per la scelta della sorgente laser più adatta al taglio dei materiali riportati, desunta a valle dell'intera attività scegliendo come fattore discriminante la qualità della lavorazione (in termini di geometria del sentiero di taglio e dei difettosità presente).

Nella stessa vengono elencate le diverse sorgenti impiegate anche in altre due tipologie di lavorazioni (marcatura ed engraving) comunque caratterizzate durante l'attività.

La possibilità di realizzare operazioni di marcatura, engraving e taglio (anche contemporaneamente) e con la stessa apparecchiatura su una gamma di materiali estremamente ampia, senza problemi di usura degli utensili, utilizzo di inchiostri e vernici sono caratteristiche non facilmente riscontrabili con altre tecnologie.

Tabella 1: Lavorazioni con le diverse sorgenti per i vari materiali.

Sorgente	Lavorazione	Materiale
Lasit FlyAir 10	Marcatura	Metallici Polimerici (PP e ABS)
Lasit FlyGreen 5	Marcatura	Cuoio Essenze lignee Pelli conciate
	Taglio	Pelli conciate Cuoio (spessori ridotti)
Lasit FlyRed 20	Marcatura	Metallici Polimerici (PP e ABS)
	Engraving	Metallici Ceramici (pietre sintetiche)
	Taglio	Compositi (CFRP)
IPG FlyFiberPlus 30	Engraving	Metallici Ceramici (pietre naturali)
	Marcatura	Metallici Polimerici (PP e ABS)
	Taglio	Compositi (CFRP) Metallici (ridotti spessori)
Lasit FlyCO ₂	Marcatura	Essenze lignee Cuoio Polimerici (PMMA)
	Engraving	
	Taglio	
Rofin StarCut	Taglio	Metallici (ridotti spessori) Ceramici (ridotti spessori) Compositi (CFRP)
	Micro-Foratura	Metallici Ceramici Compositi (CFRP)

CAPITOLO 5

Caratterizzazione di un processo di taglio laser: CFRP

5.1 Introduzione

I materiali compositi presentano differenti caratteristiche rispetto ai materiali tradizionali in termini di proprietà specifiche e di criteri di progettazione ed il loro sempre maggior utilizzo ha costretto il mondo industriale da un lato a perfezionare le tecniche di fabbricazione, dall'altro ad ideare nuove tecniche di lavorazione o, quando possibile, adattare quelle già esistenti o comunemente usate per la lavorazione dei metalli.

Al giorno d'oggi la tecnologia per il taglio dei compositi maggiormente utilizzata in ambito industriale è il *water jet*, o in alternativa quello con *lame diamantate*. Il principale limite del primo è determinato dalla larghezza del solco di taglio generato, dell'ordine del millimetro, che rende impossibile una applicazione di tale tecnologia per le micro-lavorazioni [22]. Le lame diamantate risultano più precise ma non consentono geometrie di taglio complesse che si discostano da tratti rettilinei o leggere curvature, inoltre poiché generalmente i rinforzi fibrosi sono bidimensionali, le lame diamantate possono creare tensioni tali da accentuare la delaminazione [23].

A causa della notevole differenza esistente tra la durezza delle fibre e della matrice, gli utensili risultano essere soggetti ad elevata usura durante la lavorazione e la qualità del taglio può variare durante il processo stesso. Poiché l'usura degli utensili dipende fortemente anche dalla velocità di lavorazione, si deduce come debba essere continuamente ricercato un giusto compromesso tra la velocità di lavorazione e l'usura, tutto a svantaggio della produttività e con il conseguente incremento dei costi.

La tecnologia laser supera questi limiti garantendo precisione e larghezze del solco di taglio adeguate alle micro-lavorazioni con una finitura superficiale che non necessita di ulteriori lavorazioni. Inoltre l'unione di tale tecnologia con sistemi a controllo numerico garantisce una flessibilità tale da poter realizzare qualsiasi geometria, senza problemi connessi con l'usura degli utensili e con tempi di lavorazione adeguati.

Il taglio laser essendo un processo termico può degradare il materiale lavorato producendo danni tipici quali pull out delle fibre, degrado termico di fibra e matrice, delaminazioni.

La qualità del taglio, soprattutto l'estensione della HAZ, dipende sia dalla tipologia di sorgente utilizzata che dai parametri di lavorazione [24] e le caratteristiche meccaniche del pezzo finito saranno fortemente collegate proprio all'estensione della stessa [6].

D'altro canto, le difficoltà nel garantire tagli di buona qualità non sono poche anche se molto dipende proprio dalle caratteristiche termiche di fibre e resine, dalle caratteristiche del composito (lay-up e volume percentuale di fibre), dalla tipologia di sorgente (CO₂ e Nd:YAG) e dalla modalità di funzionamento di quest'ultima (regime continuo o regime impulsato).

Numerosi studi presenti in letteratura sono quindi mirati a valutare la modalità di interazione tra fascio laser e materiali (fibre e matrice) anche se la natura eterogenea dei FRP rende decisamente complicata la previsione di un modello comportamentale.

Molti autori utilizzano il metodo *one factor at a time* e mirano a determinare, di volta in volta, l'effetto del singolo parametro energetico sulla caratteristica di interesse. Questo approccio in genere presenta qualche problema perché va a trascurare l'interazione tra i parametri. Sfruttando gli strumenti messi a disposizione dall'analisi statistica (ANOVA, RSM, DoE, ecc.) è possibile ottenere comunque un quadro più chiaro della situazione [26, 27] o pervenire alla formulare di modelli analitici in grado di descrivere il fenomeno con un grado di approssimazione sufficientemente adeguato [28].

Risultati più performanti si ottengono attraverso un'analisi termica del processo che miri a correlare le proprietà termiche del materiale (coefficiente di assorbimento ad una lunghezza d'onda, conducibilità termica) e le caratteristiche del fascio laser (lunghezza d'onda, distribuzione spaziale del fascio) alle caratteristiche del taglio. Cenna *et al* [29] sviluppano un modello che partendo da un bilancio energetico sia in grado di prevedere grandezze quali la larghezza del sentiero di taglio e l'angolo di inclinazione di taglio per campioni in AFRP e GFRP, usando una sorgente laser a CO₂ in continuo, con potenze variabili tra 600 W e 1000 W. Mentre Caprino e Tagliaferri [30] dimostrano come la distribuzione spaziale di potenza del fascio laser e la distribuzione di fibre e matrice in un laminato GFRP sia estremamente importante per l'ottimizzazione della velocità di taglio. Inoltre, sviluppano un semplice modello analitico [31] in grado di collegare la massima velocità di taglio alla potenza erogata dalla sorgente, allo spessore del laminato

ed alle proprietà del materiale. Il modello così concepito conferma i risultati ottenuti sperimentalmente durante il taglio di laminati CFRP, GFRP, AFRP.

5.2 Procedura sperimentale

Nel capitolo verranno illustrati i risultati ottenuti nella caratterizzazione del processo di taglio di laminati CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Plastic*) dello spessore di 1,2 mm, tramite una sorgente laser Nd:YAG operante in regime impulsato (mod. STARCUT 150 della Rofin), con durate nell'ordine dei milli-secondi.

Durante l'attività sono stati variati tutti quei parametri energetici caratteristici della lavorazione laser (Potenza media, frequenza di ripetizione, durata degli impulsi ed energia impulsiva) e la velocità di lavoro.

Tutto questo è stato fatto per analizzarne l'effetto sulle caratteristiche del taglio generato in termici geometrici e sui difetti, al fine di poter così prevedere un modello empirico che possa aiutare nell'ottimizzazione della qualità della lavorazione.

Come gas d'assistenza, sono stati usati gas inerte (azoto) ed aria compressa, fissando la pressione (8 bar) e la portata (25 l/min) per poterne così valutare l'effetto.

La velocità è stata fatta variare da un valore ritenuto sufficientemente basso, al fine di valutare l'influenza degli alti tempi di interazione sulle caratteristiche del taglio, sino al valore più elevato che fosse in grado di garantire la condizione di taglio passante.

Seppure il fattore di ricopertura debba mantenersi superiore all'80% per aumentare la qualità del taglio, questa seconda scelta è risultata importante per stabilire quale sia la velocità massima ottenibile al variare dei parametri energetici erogati dalla sorgente.

Sono stati realizzati non meno di tre tagli di circa due 2 cm di lunghezza, opportunamente distanziati al fine di evitare interferenze tra due tagli successivi. Per ciascuna condizione operativa perciò è stato determinato il valore medio e la dispersione di ciascuna grandezza d'interesse e rapportati ai parametri operativi.

La sperimentazione è stata eseguita su provini ricavati da un laminato CFRP (fig.1) ottenuto mediante cura in autoclave (180 °C e 6 bar). I materiali costituenti sono:

- *Fibra di carbonio T 400*. Si tratta di una fibra *PAN-based* caratterizzata da una più elevata resistenza, soprattutto a compressione, rispetto alla fibra *PITCH-based*.

- *Resina epossidica HMF 934* (che assicura proprietà meccaniche fino a temperature di esercizio di 93 °C in ambienti umidi, e di 180 °C in ambienti asciutti).

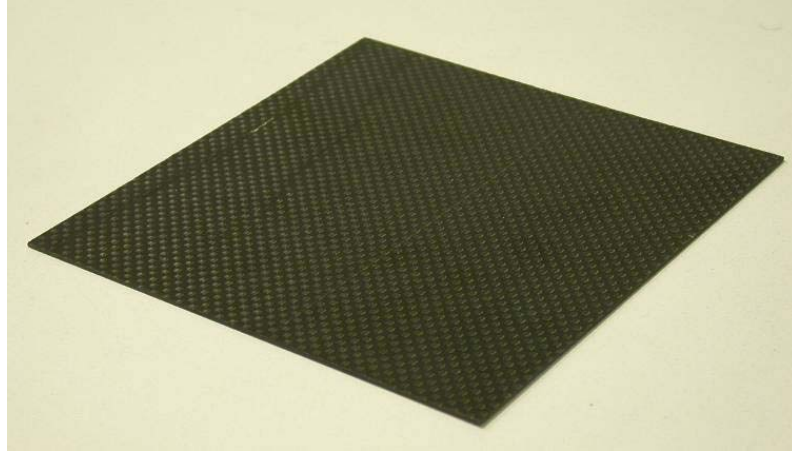


Figura 1: laminato CFRP

Il laminato ha lo spessore di 1.2 mm ed è realizzato mediante la sovrapposizione di 12 lamine:

- 4 ply di tessuto (0,90) di grammatura pari a 193 g/m²;
- 8 ply monodirezionali di grammatura pari a 145 g/m².

La percentuale complessiva di fibre è pari al 60%. Le ply sono simmetriche rispetto al piano medio del laminato con la seguente stratificazione:

$$[(0,90)_2/+45_2/-45_2/-45_2/+45_2/(0,90)_2].$$

I parametri energetici usati sono riportati in tab. 1 ed in tab. 2.

Al fine di garantire una elevata maneggiabilità durante la fase di analisi e misurazione, è stato necessario inglobare i provini all'interno di un polimero che fosse in grado di fornire un adeguato contrasto per facilitare l'osservazione al microscopio.

La soluzione scelta consiste nel porre i provini in CFRP tra due lamierini di ABS (*Acrilnitrile-Butadiene-Stirene*) bianco realizzando così un sandwich.

Per prima cosa si solubilizza l'ABS con un apposito solvente, poi con una apposita spatola si ricoprono le incisioni sul provino di CFRP utilizzando questa sospensione al pari di un adesivo ed infine si inserisce il provino impregnato tra le due lamierini di

ABS. Il tutto è tenuto in pressione con pinzette sino alla completa vaporizzazione del solvente. In figura 10 è schematizzato il procedimento descritto.

Tabella 1: parametri energetici usati per le prove effettuate in corrente di aria.

Durata (ms)	Frequenza (Hz)	Tensione (V)	Energia (J)	Ppk (kW)	Pot. Media (W)
0,1	650	700	0,2	2,15	140
0,25	150	700	0,6	2,55	95,7
	200	650	0,5	2,00	99,8
	250	650	0,4	1,48	92,2
0,5	150	500	0,5	1,06	79,7
	150	600	0,6	1,19	89
	200	500	0,4	0,74	73,8
1	100	420	0,6	0,67	67,4
	150	400	0,5	0,54	81,2
	200	400	0,4	0,33	65,8

Tabella 2: parametri energetici usati per le prove effettuate in corrente di azoto.

Durata (ms)	Frequenza (Hz)	Tensione (V)	Energia (J)	Ppk (kW)	Pot. Media (W)
0,15	300	700	0,317	2,11	95
	1500		0,063	0,42	95
0,2	185		0,514	2,57	95
	1350		0,070	0,35	95
0,1	597		0,159	1,59	95
	650		0,215	2,15	140
	1600		0,059	0,59	95
0,05	1790		0,053	1,06	95
	2000		0,048	0,95	95
0,25	140		0,750	3,00	105
	1300		0,081	0,32	105

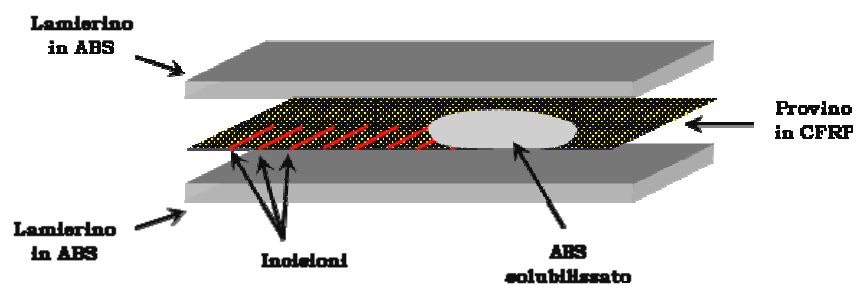


Figura 2: Processo di inglobamento dei provini in ABS.

Dopo che il solvente è evaporato, si tolgono le pinzette e si provvede a lucidare il provino tramite carte abrasive sempre più fini in modo tale da aver una visione chiara della sezione del solco al microscopio. E' da notare che non solo l'ABS ci ha fornito il necessario contrasto per poter rilevare gli output ma è servito anche come supporto,

senza alterare il profilo geometrico dell'incisione. I provini così ottenuti (fig. 3) si sono prestati bene alle misurazioni in sezione eseguite al microscopio.

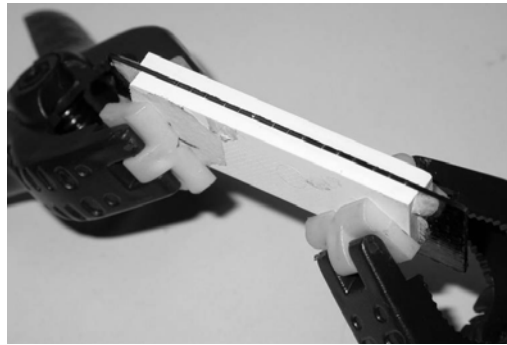


Figura 3: Provino inglobato in ABS.

Per quanto concerne la geometria dei solchi sono stati analizzati (fig. 4):

- Upper Kerf: larghezza del solco nella zona di entrata;
- Down Kerf: larghezza del solco nella zona di uscita;
- Taper angle: angolo di inclinazione del sentiero di taglio.

Per quanto concerne la difettosità sono state analizzate le seguenti caratteristiche:

- Taglio non passante;
- Pull out delle fibre;
- Bridging.
- Delaminazione superficiale e/o interna
- Degrado superficiale della matrice;
- Degrado interno (ZTA nella vista in sezione);

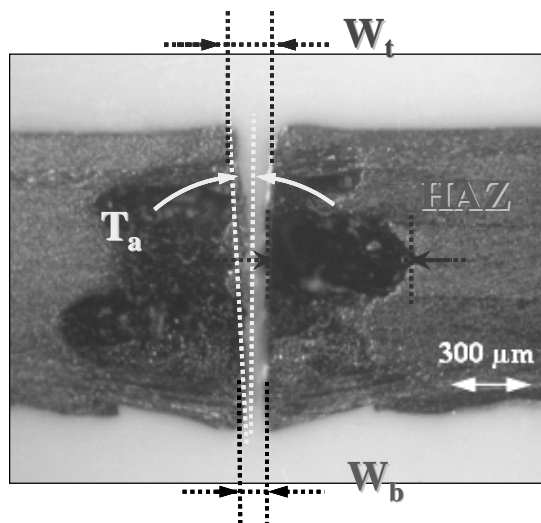


Figura 4: caratteristiche analizzate

5.3 Taglio con aria compressa: analisi dei risultati.

Una prima analisi dei risultati ha permesso di individuare in funzione di potenza media e velocità di lavoro le condizioni operative che permettono di ottenere, per i valori di durata dell'impulso ed i valori di energia, la condizione di taglio passante.

In funzione dei suddetti parametri è stato possibile definire un'area di taglio (*Cutting Region*) ed un'area di non taglio (*No Cutting Region*) ed osservare come esista una relazione pressoché lineare tra la velocità massima ottenibile e la potenza erogata dalla sorgente (fig.5).

È inoltre possibile osservare come le velocità di taglio più elevate si abbiano per valori di durata impulsiva decrescenti ottenendo un valore di circa 17 mm/s per un durata dell'impulso di 0.10 ms.

Per tali condizioni, infatti, l'energia impulsiva è rilasciata in intervalli di tempo estremamente brevi, da cui gli elevati valori di potenza di picco raggiunti permettono un migliore interazione favorendo l'immediata vaporizzazione del materiale, permettendo contemporaneamente l'uso di una velocità di taglio più elevata.

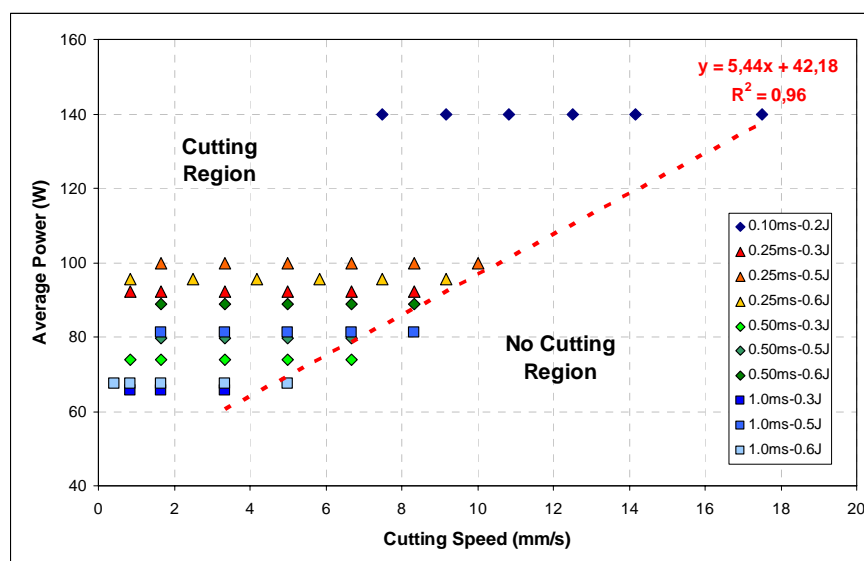


Figura 5: Area limite in funzione di potenza media e velocità di taglio.

L'area di lavoro individuata può essere visualizzata allo stesso modo anche se mettiamo in relazione altri due parametri energetici fondamentali nello studio dell'interazione tra laser e materia, soprattutto per i laser a regime di funzionamento impulsato: Energia impulsiva (J) e fattore di ricopertura (%).

Viene così steso un grafico (fig. 6) dove è ancora possibile individuare due aree di lavoro anche se la separazione non è netta come nel caso della potenza. Un aumento

dell'energia impulsiva porta ad una riduzione del fattore di rivestimento minimo, indipendentemente dalla potenza media.

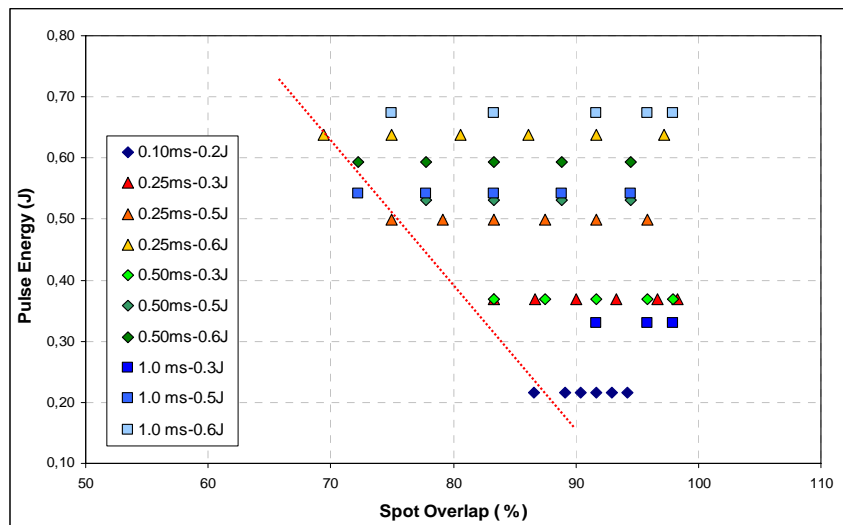


Figura 6: Area di lavoro in funzione di energia impulsiva e fattore di ricopertura.

Individuate le condizioni operative che permettono di ottenere taglio passante ci siamo concentrati ad analizzare la qualità dei tagli effettuati mediante analisi ottica.

I risultati ottenuti per la larghezza del sentiero di taglio dal lato d'ingresso del fascio laser e dal lato d'uscita sono riportati in fig. 7 e mostrano come all'aumentare della velocità di taglio entrambe le caratteristiche tendono a diminuire. Questi risultati, confermati da diversi autori non sono sorprendenti poiché, essendo il taglio laser una lavorazione termica, il tempo di interazione del fascio laser con il materiale risulta fondamentale nel meccanismo di trasmissione dell'energia dal fascio al materiale: una maggiore interazione laser-materia porta ad una maggiore asportazione di materiale.

Dagli stessi andamenti è comunque possibile osservare anche come la dispersione dei dati è comunque elevata e l'influenza degli altri parametri energetici (in particolare energia e durata impulsiva) non sembra essere presente.

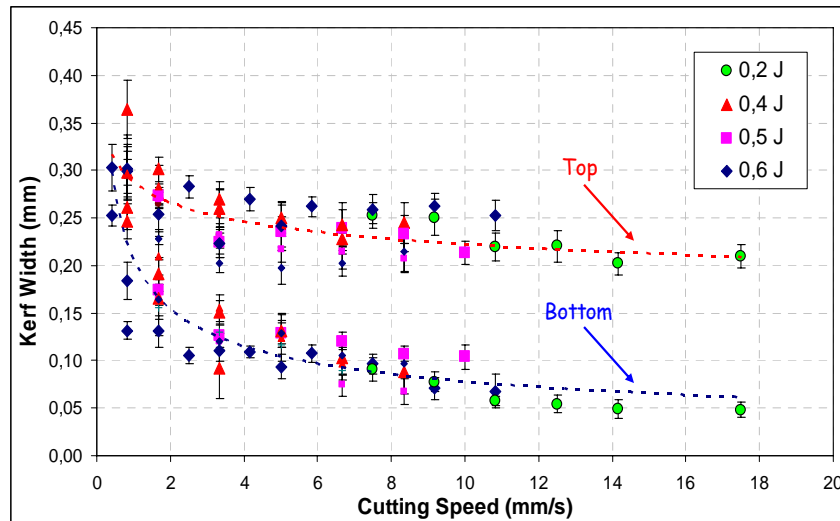


Figura 7: variazione della larghezza del sentiero di taglio in funzione della velocità.

La stessa dispersione perciò si trasferisce anche alla misura dell'angolo di inclinazione delle superfici laterali del sentiero di taglio misurato a partire dalle due larghezze, come descritto nel capitolo 2.

A parità di condizione energetica, l'angolo di conicità si mantiene praticamente costante con la velocità. Inoltre (fig. 8) analogamente al caso delle larghezze, non c'è dipendenza né dall'energia né dalla durata impulsiva.

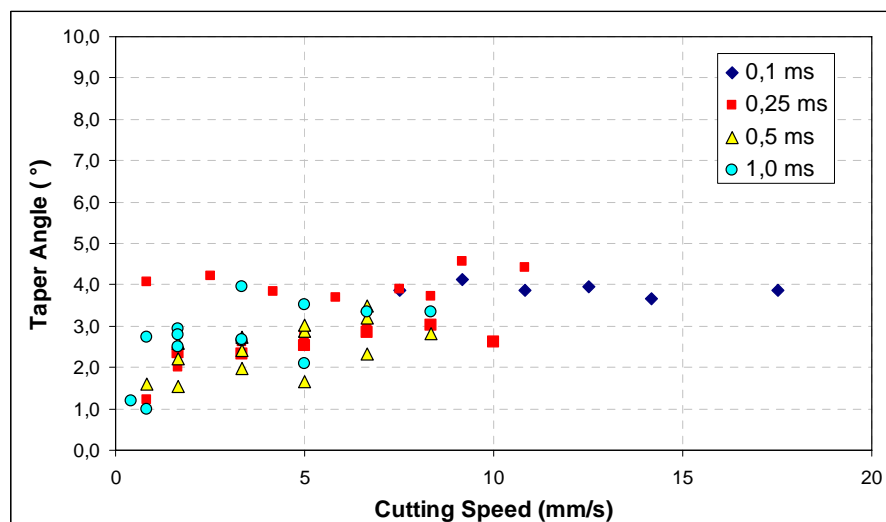


Figura 8: variazione dell'angolo di inclinazione al variare della velocità di taglio.

Quanto detto è giustificabile in parte dai bassi valori (che comunque si mantengono tra 1° e $4,5^\circ$) ed in parte dalla difficoltà di prevedere la forma della sezione di taglio. Infatti, si può notare come quest'ultima sia estremamente variabile, passando da una forma tipicamente *a chiodo* ad una forma più a "V" (fig. 9). Ciò rende maggiormente difficile effettuarne la misura corretta partendo dalle dimensioni esterne dei sentieri.

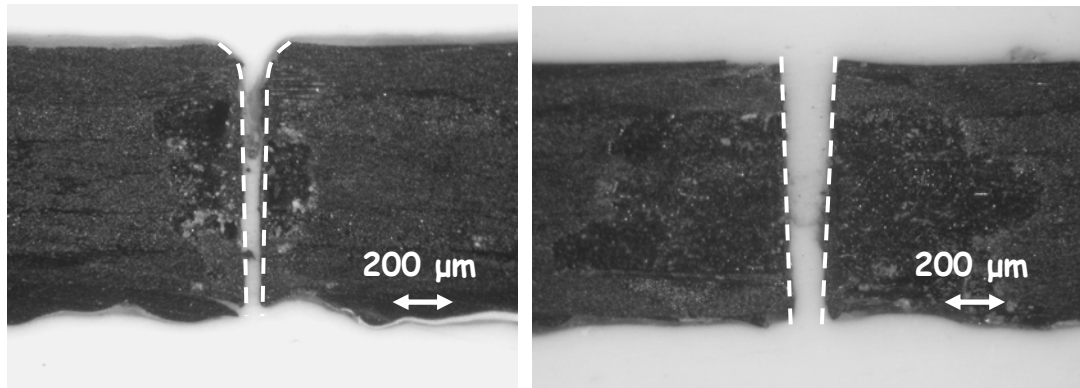


Figura 9: differenti sezioni di taglio.

In linea di massima, per le condizioni operative ad energia impulsiva maggiore le sezioni hanno una forma a “V”, mentre per le condizioni operative ad energia impulsiva minore la forma è più “a chiodo”.

Tuttavia, a parità di energia fornita, dall’analisi complessiva delle sezioni non è stato possibile riscontrare un trend che permettesse di caratterizzare, in funzione degli altri parametri operativi, la variazione della forma, da cui l’incertezza sull’angolo di inclinazione.

Oltre alla geometria della zona di taglio, altro parametro importante nella definizione della qualità, è la *Zona Termicamente Alterata* denominata nel seguito *HAZ* (*Heat Affected Zone*). Questa è tipicamente formata da un volume prossimo alla zona di taglio, dove sono presenti gli effetti termici dell’operazione stessa. Infatti, il calore trasmesso dal fascio in parte servirà a vaporizzare il materiale ed in parte verrà dissipato dalla fibre, causando così un notevole incremento della temperatura nella zona adiacente al sentiero. L’innalzamento locale della temperatura causa il degrado della resina, in virtù delle sue ridotte proprietà termiche. Da cui, la HAZ si estenderà fintanto che la temperatura è superiore alla temperatura di decomposizione della resina [32].

La resina bruciata non riesce più a mantenere unite le fibre e la parte di materiale interessato presenta proprietà meccaniche inferiori rispetto allo stesso materiale non lavorato. Questo aspetto è particolarmente critico, ad esempio, nelle operazioni di foratura necessaria alla successiva giunzione con rivetti, poiché è proprio la zona attraverso la quale si trasmettono le sollecitazioni.

L'estensione della HAZ è stata valutata nella mezzeria del campione (come illustrato in figura 10). A causa dei prodotti derivanti dalla carbonizzazione della resina, la HAZ è estremamente visibile.

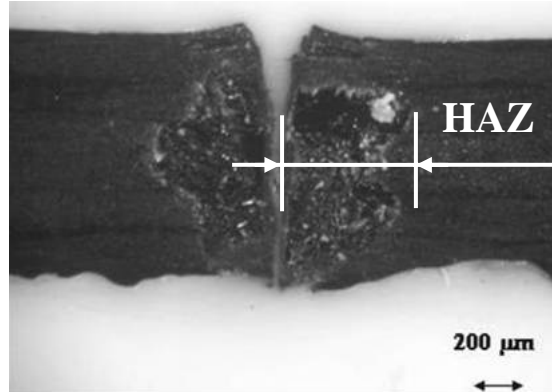


Figura 10: Zona Termicamente Alterata (vista in sezione)

Riportando la variazione in funzione del fattore di ricopertura per tutte le durate impulsive testate (fig. 11) si può notare come la HAZ aumenti all'aumentare del fattore di ricopertura e come diminuisca al diminuire della durata impulsiva.

Per tutte le durate impulsive, l'andamento è ben approssimato da una legge esponenziale del tipo:

$$y = a \cdot e^{b \cdot x}$$

Da cui si può dedurre come l'estensione dipenda fortemente, non tanto dall'energia impulsiva, quanto piuttosto dalla modalità con la quale l'energia totale è ceduta (frequenza e durata impulsiva) e dal tempo di interazione (velocità di lavoro).

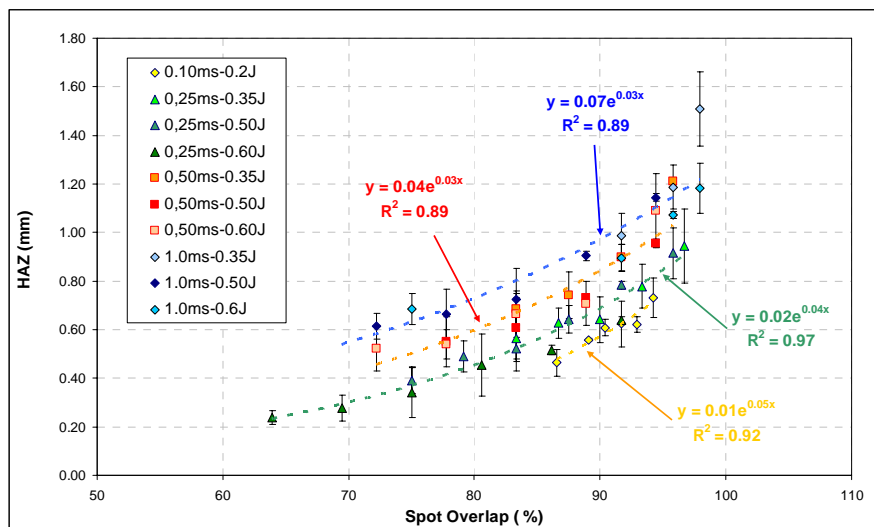


Figura 11: Variazione della HAZ in funzione del fattore di ricopertura per le diverse durate impulsive.

Per una fissata velocità di lavoro e per una fissata durata impulsiva, bisogna osservare che all'aumentare del fattore di ricopertura (quindi della frequenza) si tende sempre di più ad approssimare un funzionamento in regime continuo, il che si traduce in un carico termico molto elevato. Di conseguenza, vengono meno i benefici che derivano dall'adozione di un regime di funzionamento impulsato.

La forma della HAZ non è uniforme ma varia lungo lo spessore del componente e da taglio a taglio, anche a parità di condizioni energetiche.

Il motivo principale a cui ricondurre questo effetto è collegato alla differente orientazione delle fibre rispetto alla direzione del fascio, e quindi alla diversa modalità di dissipazione dell'energia.

Le fibre, infatti presentano un differente coefficiente di conduzione del calore, maggiore in direzione longitudinale e minore in direzione radiale [33]. Quando la direzione di avanzamento del fascio è parallela alle fibre, il calore dissipato serve a preriscaldare il materiale avanti al fascio, favorendo il processo di taglio, mentre una piccola aliquota è dissipata in direzione perpendicolare provocando il degrado della resina.

Quando invece le fibre sono orientate perpendicolarmente alla direzione di avanzamento del fascio, la maggior parte del calore dissipato va a causare il degrado della resina nelle zone adiacenti (fig.12).

Da cui, poiché l'orientazione delle fibre varia (dato il lay-up del laminato), si rende comprensibile la non uniformità della HAZ lungo lo spessore. Essendo, inoltre, l'orientazione locale delle fibre diversa si deduce il perché due tagli adiacenti avranno una forma della HAZ diversa, con condizioni operative equivalenti.

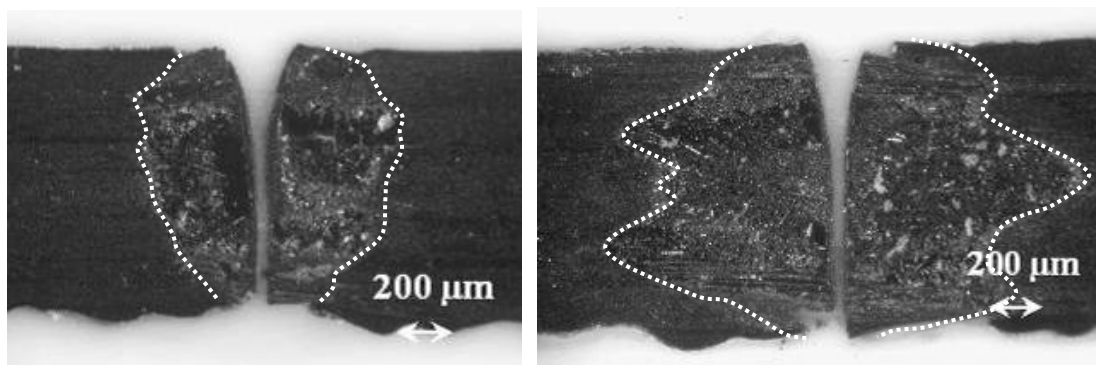


Figura 12: variazione della forma ed estensione della HAZ per due velocità di taglio.

Questo aspetto non ha comunque costituito un problema, poiché per la valutazione della HAZ è stato considerato il valore massimo dell'estensione in direzione perpendicolare al sentiero di taglio.

Anche il degrado superficiale risulta essere un problema particolarmente rilevante che deriva da un principio analogo a quello che causa la formazione della HAZ.

Poiché gli strati più esterni del laminato sono costituiti da tessuto (0,90), la parte superiore è caratterizzata da un degrado superficiale del materiale che aumenta là dove le fibre sono orientate in modo trasversale alla direzione di avanzamento del fascio laser piuttosto che in modo longitudinale (fig. 13). Inoltre i prodotti derivanti dalla combustione della matrice andranno a depositarsi sulla superficie stessa tendendo a compromettere la qualità. Anche il lato inferiore è caratterizzato da un degrado funzione dell'orientamento delle fibre anche se l'azione esplicata dal gas d'assistenza è in grado di allontanare i prodotti della combustione all'uscita del kerf.

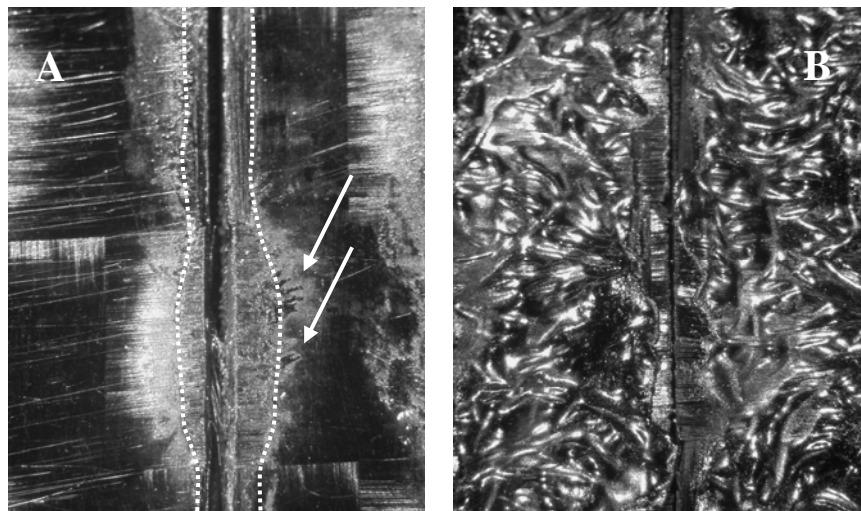


Figura 13: vista superiore (A) e vista inferiore del sentiero di taglio (B).

L'analisi al microscopio ha mostrato la quasi totale assenza dell'assenza di delaminazione interna.

5.3. Taglio con azoto: analisi dei risultati.

La sperimentazione effettuata con aria compressa ha permesso di ottenere importanti risultati sulla modalità di interazione tra fascio laser e materiale, sfruttati per la pianificazione della seconda parte.

Una riduzione della HAZ si può ottenere riducendo sia la durata dell'impulso che il fattore di ricopertura ossia la frequenza di ripetizione (fissata la velocità di taglio). D'altro canto, mentre la velocità di taglio dipende linearmente dalla potenza erogata dalla sorgente (fig. 5), il fattore di ricopertura sembra essere legato all'energia impulsiva (fig. 6).

Volendo quindi confermare queste tendenze sono state scelte durate impulsive comprese tra 0.05 ms e 0.25 ms (inferiori al caso precedente) e per ogni durata 2 valori di frequenza (una inferiore a 600 Hz e l'altro superiore a 1300 Hz). Mantenendo quindi la potenza media costante a circa 100 W (fatta eccezione per la condizione a 0.10 ms e 650 Hz), i valori di energia impulsiva ottenuti sono compresi tra 0.054 J e 0.751 J.

Le diverse combinazioni sono già state riportate in tab. 2.

I risultati riportati in fig. 14 tendono a confermare quanto precedentemente ottenuto, poiché anche per l'azoto esiste una dipendenza lineare tra il minimo fattore di ricopertura ottenibile e l'energia impulsiva.

Un aumento dell'energia impulsiva permette di ottenere la condizione di taglio passante per valori del fattore di ricopertura decrescenti.

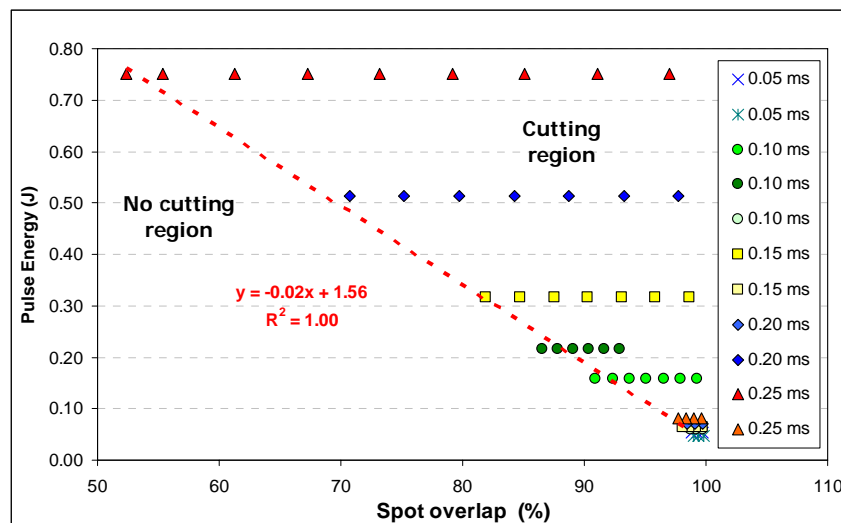


Figura 14: Area di lavoro in funzione di energia impulsiva e fattore di ricopertura.

Ricordando le curve caratteristiche della sorgente laser usata (capitolo 3), a parità di potenza media, l'energia impulsiva diminuisce al diminuire della durata dell'impulso ed all'aumentare della frequenza di ripetizione ed a partire da 1300 Hz, si assiste ad una drastica diminuzione dell'energia stessa che assume valori tra 0.053 J e 0.074 J (un ordine di grandezza inferiore a quanto ottenuto per le frequenze inferiori a 600 Hz).

Quindi ad alte frequenze la condizione di taglio passante è garantita per fattori di ricopertura molto elevati (superiori al 98%).

Come evidenziato in figura 15, per frequenze superiori a 1300 Hz la velocità massima di taglio è inferiore ai 6 mm/s e non registra sostanziali variazioni, se paragonate alle velocità raggiungibili per frequenze inferiori a 600 Hz.

Anche in questo caso si sono ottenute *un'area di taglio* ed *un'area di non taglio* che suggeriscono come la diversa modalità di cessione dell'energia dal fascio laser ai materiali influenzi le caratteristiche del processo.

Bassi valori di frequenza ed elevati valori di energia impulsiva permettono di ottenere velocità di taglio maggiori rispetto ad elevate frequenze e bassi valori di energia impulsiva.

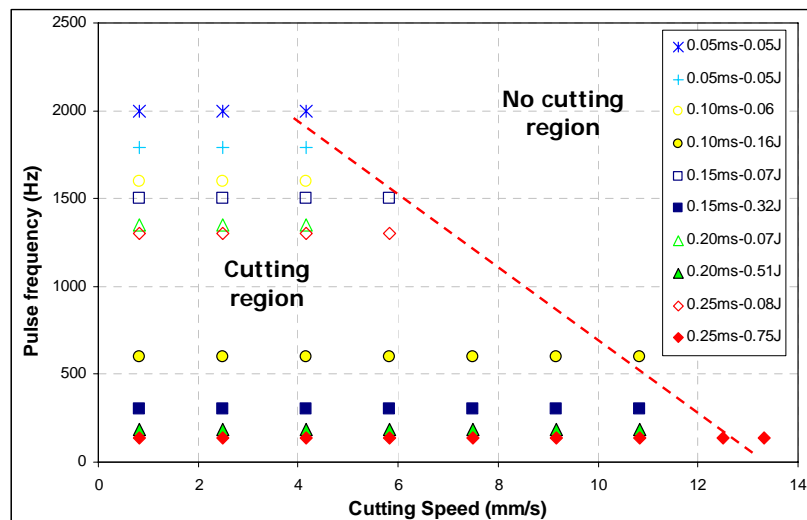


Figura 15: Variazione della velocità di taglio in funzione della frequenza.

La velocità di taglio ed il fattore di ricopertura non sembrano particolarmente influenti sulla geometria del sentiero in termini di Upper kerf e Down kerf. Riportando i valori misurati per le diverse durate ed energie impulsive, entrambe le grandezze non sembrano subire una significativa influenza da parte della velocità (fig. 16 e fig. 17), fatta eccezione che per le condizioni a 0.25 ms e 0.750 J (massimo valore di energia impulsiva testato) che si discosta dal resto degli andamenti.

I valori della larghezza superiore sono comunque molto contenuti (fatta eccezione che per la condizione precedentemente detta) e compresi tra 0.160 mm e 0.260 mm, mentre la larghezza inferiore varia tra 0.70 mm e 0.120 mm.

La dispersione dei valori (individuata dalla linee verticali su ciascun marker) è comunque significativa e varia dal 2% al 22% per l'upper kerf e dal 5% al 19% per il down kerf).

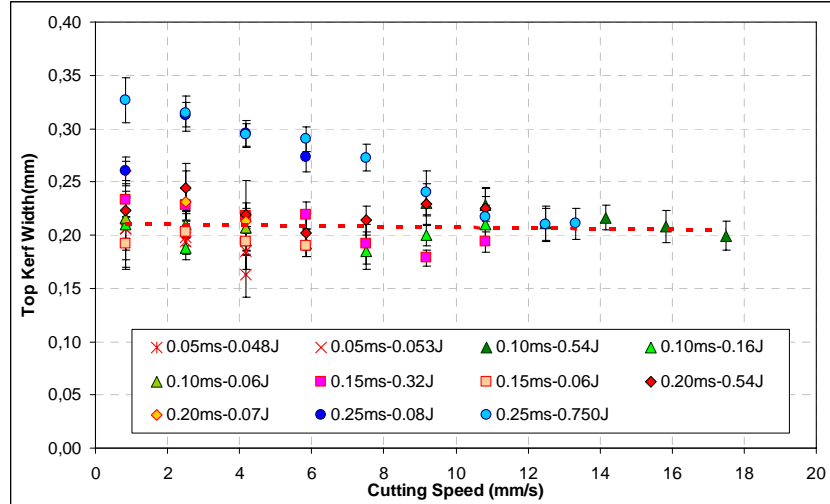


Figura 16: variazione della larghezza superiore del sentiero di taglio in funzione della velocità.

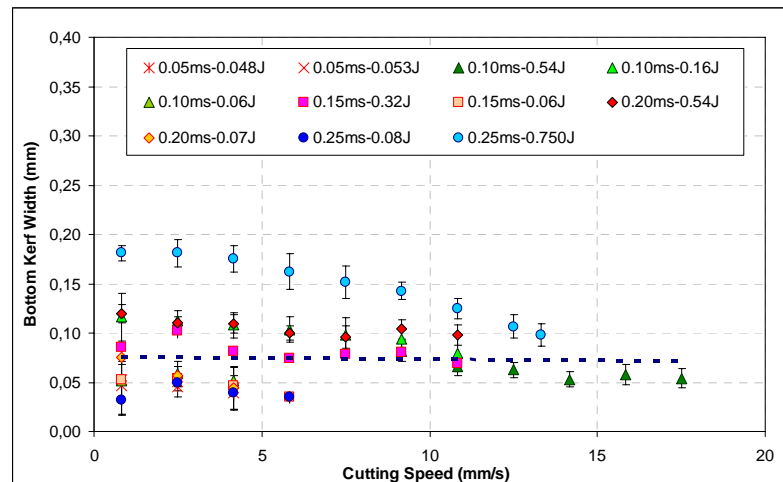


Figura 17: variazione della larghezza inferiore del sentiero di taglio in funzione della velocità.

Per una fissata velocità, invece, un aumento di energia impulsiva agisce sia sulla larghezza superiore che sulla larghezza inferiore: più bassa è la velocità e più si nota questa dipendenza dall'energia, soprattutto per frequenze inferiori a 600 Hz (*marker pieni*) (fig. 18 e fig. 19).

Alle alte frequenze (*marker vuoti*), essendo minima la variazione di energia, non si riescono ad ottenere andamenti significativi della dipendenza del kerf dall'energia stessa. In questo caso, inoltre nonostante le velocità di taglio decisamente inferiori la larghezza superiore del sentiero di taglio è confrontabile con quella ottenuta alle basse frequenze, mentre la larghezza inferiore assume valori più basso.

Infatti, un tempo di interazione più elevato tende a favorire una asportazione superficiale di materiale maggiore, mentre la ridotta energia trasferita è assorbita completamente lungo lo spessore ed è quindi appena sufficiente a raggiungere il lato inferiore, con la conseguente riduzione del kerf dal lato di uscita.

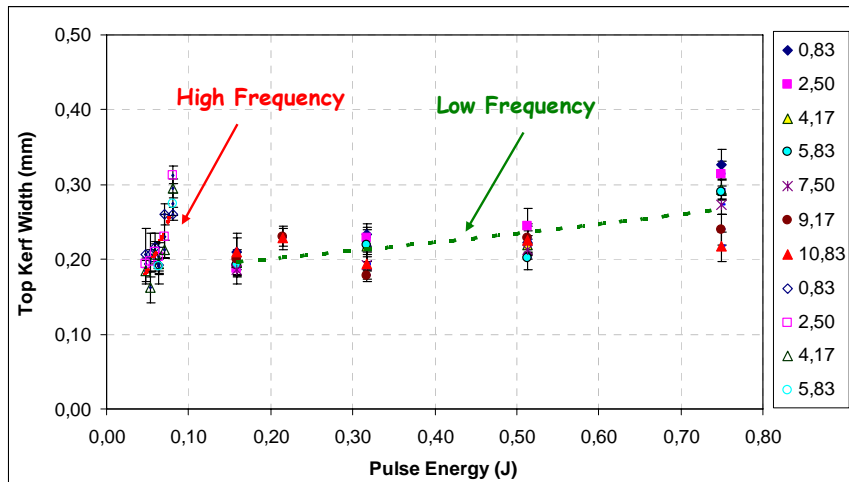


Figura 18: Larghezza superiore al variare dell'energia impulsiva per le diverse velocità di taglio.

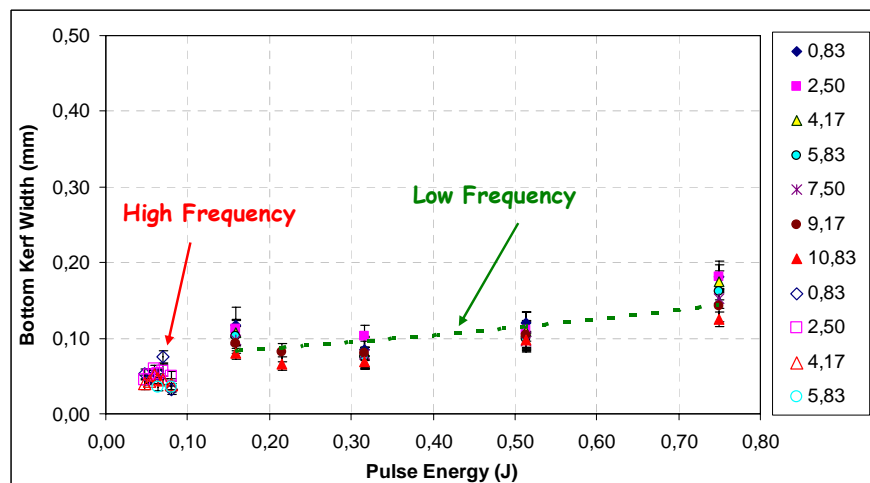


Figura 19: Larghezza inferiore al variare dell'energia impulsiva per le diverse velocità di taglio.

Questo effetto si ripercuote ovviamente sull'angolo di inclinazione delle superfici del sentiero, sempre misurato a partire dalle due larghezze.

Come possibile notare (fig. 20) per i valori più elevati di energia l'angolo si mantiene sostanzialmente costante al variare dell'energia e non varia con la velocità; riferendosi invece alle considerazioni fatte sulla larghezza per la basse energie (alte frequenze) si può facilmente spiegare il rapido aumento dell'angolo stesso con l'energia.

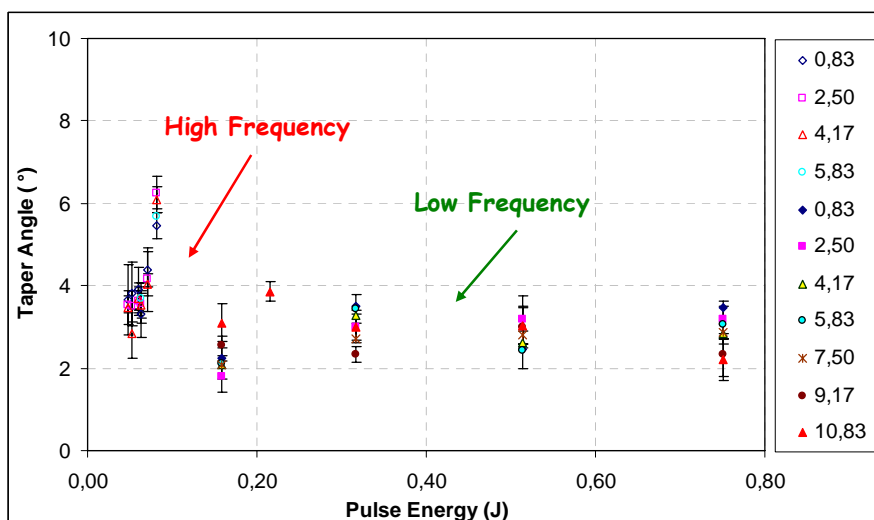


Figura 20: Angolo di conicità in funzione della energia impulsiva per le diverse velocità di taglio.

Si evidenzia che i valori riscontrati sono comunque molto bassi e compresi tra 2° e 4° per le basse frequenze, mentre risultano lievemente maggiori per le alte frequenze: da un valore minimo di 4° fino ad arrivare ad un picco di 7° per la condizione a 0.25 ms e 1300 Hz.

Tuttavia, come per l'aria, anche in questo caso la forma in sezione del sentiero di taglio è risultata alquanto variabile (forma a chiodo o forma a "V").

Si è notato che la forma dei solchi è di tipo "a chiodo" quando si lavora ad alte frequenze, mentre a basse frequenze la forma in sezione diventa conica e somiglia ad una "V".

Anche la velocità di taglio influenza la geometria: diminuendo la velocità si accentua la parte superiore della forma a chiodo che diventa più estesa, facendo ridurre il tratto rettilineo, mentre per le condizioni a bassa frequenza il taglio tende a diventare lineare al diminuire della velocità e la forma a "V" risulta meno accentuata.

I altri difetti maggiormente riscontrati sono stati il bridging ed il pull out delle fibre, oltre al degrado superficiale. In alcune condizioni, infatti, lo scarso apporto di energia riesce a vaporizzare la matrice ma non le fibre, che quindi fuoriescono dalla zona di taglio con lunghezza variabile (*pull out*) o continuano a collegare i lembi di materiale tagliato (*bridging*). Nella immagine 21 si riportano alcuni esempi di quanto ottenuto.

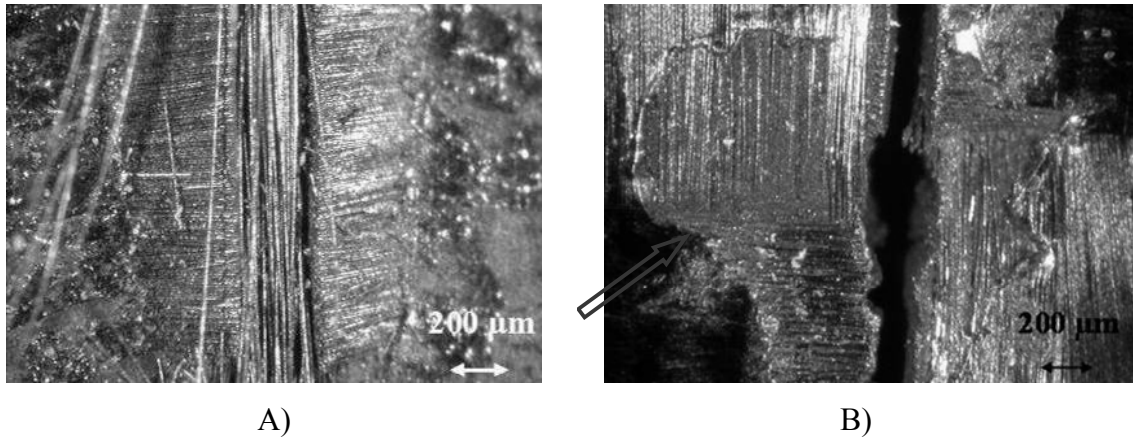


Figura 21: A) Bridging e pull out delle fibre, B) degrado superficiale della matrice nel taglio con azoto.

Dalle stesse osservazioni si è potuta notare l'assenza di delaminazione all'interno del materiale lontano dal volume interessato dalla lavorazione.

Passando all'analisi della HAZ, riportando la variazione in funzione del fattore di ricopertura, dal grafico in fig. 22 è possibile notare due distinti comportamenti: uno per $R\% \leq 98.5$ ed uno per $R\% > 98$ oppure, in base a quanto ottenuto e riportato in fig. 13, uno per alta energia ed uno per bassa energia impulsiva.

In entrambi i casi, gli andamenti possono essere approssimati con una legge di tipo esponenziale (in accordo con quanto ottenuto per l'aria) anche se per $R\% > 98.5$, la pendenza della curva è nettamente superiore.

Tra l'altro il valore 98.5% coincide con il massimo fattore di ricopertura usato nel caso del taglio con aria compressa.

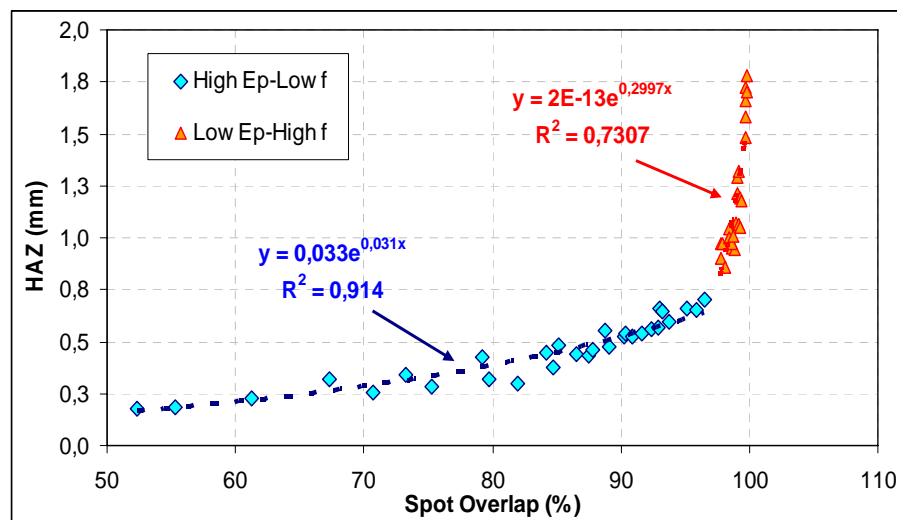


Figura 22: Estensione della HAZ in funzione del fattore di ricopertura.

Questa diversa tendenza può trovare una valida giustificazione nel fatto che un aumento di R%, ossia un aumento di frequenza, tende ad approssimare un funzionamento in regime continuo che, come noto, induce un danno termico maggiore indipendentemente dall'energia (e quindi dalla durata).

Al contrario, per $R\% \leq 98.5$ l'influenza di τ è comunque significativa tanto che è possibile individuare in maniera netta l'influenza della durata.

In fig. 23 si riportano gli andamenti relativi ai valori della HAZ per R% inferiori al 98.5 con le relative curve (*linee tratteggiate*) ed equazioni.

A causa della minore differenza tra le durate rispetto all'aria, la separazione tra i diversi andamenti è meno netta ma il grado di approssimazione è comunque molto elevato.

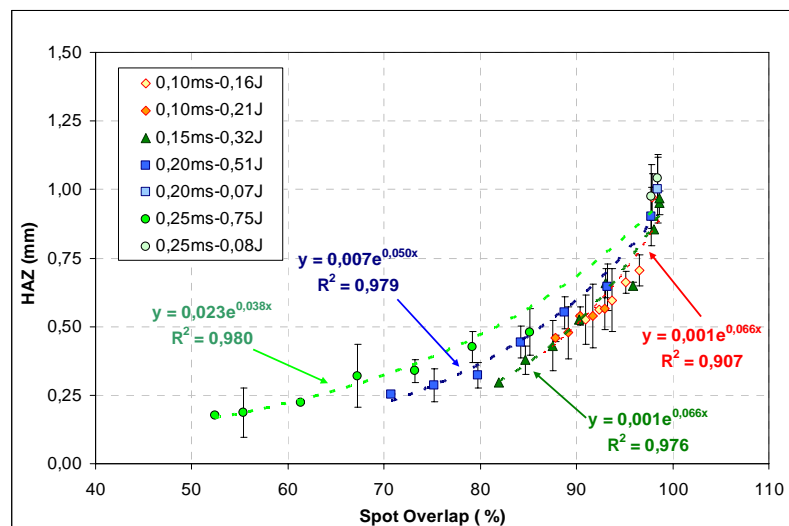


Figura 23: HAZ in funzione del fattore di ricopertura per le diverse durate impulsive.

Analizzando la situazione in modo diverso, valutando la variazione della HAZ in funzione della velocità per tutte le frequenze testate (fig. 24), l'effetto positivo che ha un aumento di velocità e/o una riduzione di frequenza sull'estensione della ZTA è confermato. Superati i 1300 Hz, la dipendenza dalla frequenza è molto meno marcata rispetto a quanto notato in precedenza. Ciò perché la riduzione dell'energia d'impulso e l'alta frequenza tendono ad una situazione sempre più simile a quella ottenibile con un laser continuo.

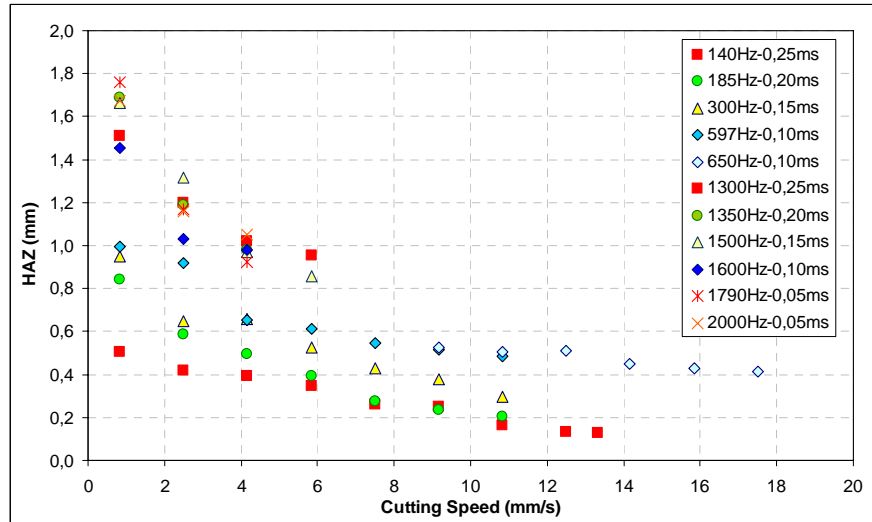


Figura 24: ZTA in funzione della velocità di taglio.

Anche in questo caso, la HAZ lungo lo spessore del laminato non è uniforme, ma presenta una diversa estensione a seconda delle plies e quindi dell'orientazione delle fibre rispetto alla direzione di avanzamento del fascio. La disuniformità della HAZ è risultata proporzionale alla sua estensione.

5.3. Confronto dell'estensione della HAZ.

Tra tutti i difetti riscontrati durante l'attività sperimentale, quello sicuramente più critico ai fini della qualità del processo è proprio l'estensione della HAZ.

Da quanto ottenuto, è evidente che la HAZ dipende dall'energia totale trasferita dal fascio laser al materiale e dalla modalità con la quale questa è ceduta.

A tale scopo, la variazione della HAZ può essere ben rappresentato tramite il prodotto tra l'energia totale per l'unità di lunghezza ed il tempo effettivo di interazione nell'unità di tempo. Questo prodotto, nel seguito indicato con K, sarà quindi espresso tramite la seguente:

$$K = \left(\frac{P_m}{v} \right) \cdot (f \cdot \tau)$$

Dalla fig. 25 è evidente come sia possibile legare, attraverso una legge di tipo logaritmico, l'estensione della HAZ a tutti i parametri operativi direttamente gestibili dal sistema laser Rofin (durata dell'impulso, frequenza di ripetizione e velocità di processo).

Dallo stesso grafico è inoltre possibile osservare come il gas d'assistenza non sembra avere un effetto marcato sull'estensione della HAZ.

Inoltre, è anche possibile notare come il gas d'assistenza non sembra avere una marcata influenza sull'estensione della HAZ. Come riportato in letteratura [25], ciò indica che il compito principale del gas assistenza nel taglio laser di CFRP è la semplice rimozione meccanica dei sottoprodotti dalla zona di taglio.

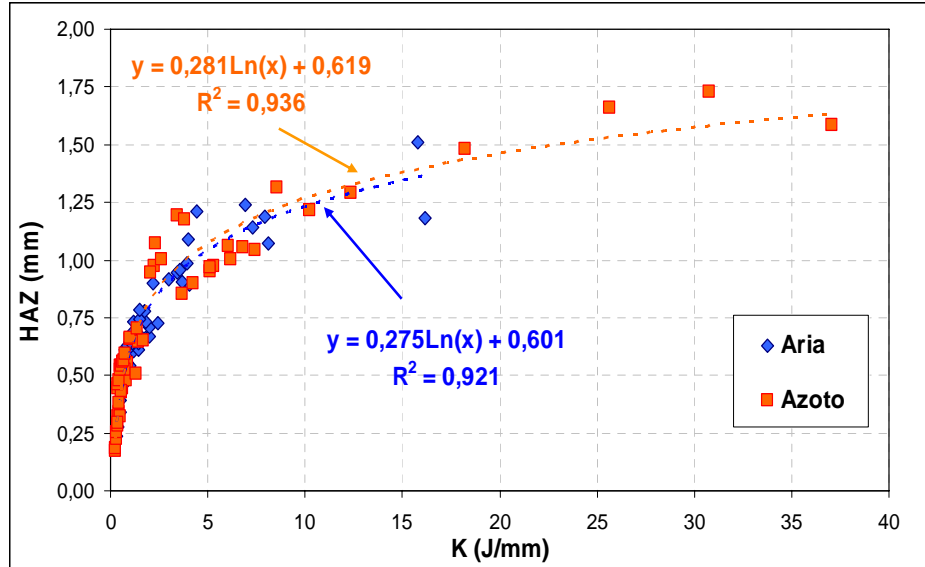


Figura 25: estensione delle HAZ in funzione del parametro K.

Il prodotto tra frequenza e durata impulsiva, chiamato da molti autori *on-time*, può essere anche interpretato come la percentuale di tempo, rispetto al tempo totale di interazione, in cui il laser effettivamente è attivo e quindi fornisce energia al materiale. L'importanza dell'*on-time* può essere messo maggiormente in evidenza riportando l'estensione della HAZ in funzione della densità totale di energia, definita come [34]:

$$E_d = (E/v \cdot \tau \cdot d)$$

I risultati conseguiti confermano completamente quanto visto in letteratura ossia che la dipendenza della HAZ in funzione della densità di energia così definita può essere rappresentata da una legge di tipo logaritmico [34], sia per l'azoto (fig. 26) che per l'aria compressa (fig. 27).

Dalla stesse è quindi possibile evidenziare l'influenza dell'*on-time* sul danno termico indotto. Infatti, fissato la densità di energia, il danno termico aumenta all'aumentare dell'*on-time* in entrambi i casi.

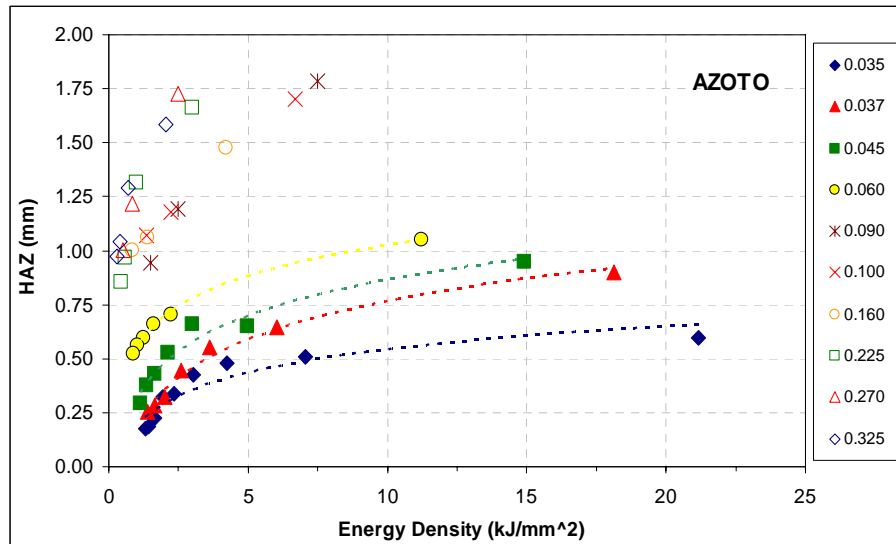


Figura 26: estensione della HAZ in funzione della densità di energia per diversi valori di on-time.

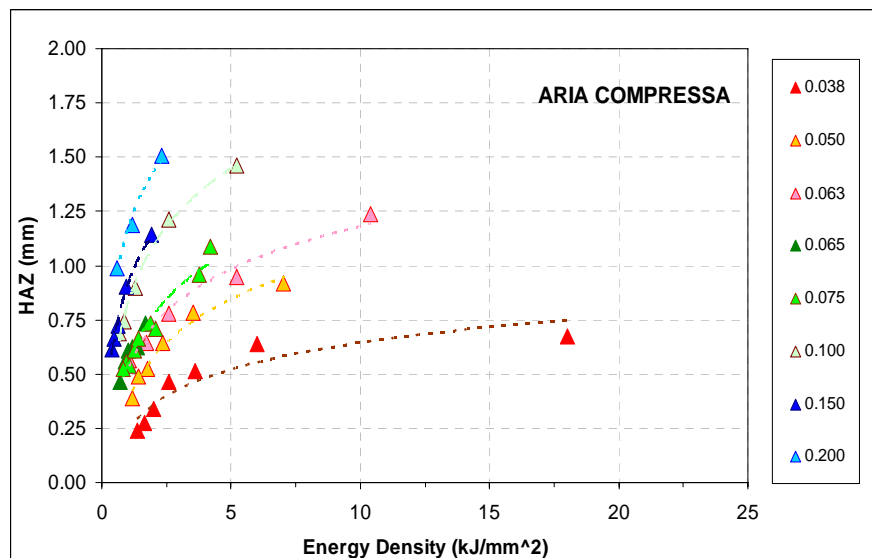


Figura 27: estensione della HAZ in funzione della densità di energia per diversi valori di on-time.

CONCLUSIONI

L'attività svolta nei tre anni è stata pianificata con l'intento di dimostrare la validità della tecnologia laser nelle lavorazioni di taglio di materiali innovativi e tecnologicamente avanzati. La finalità è quella di favorire l'ingresso di questa tecnologia in diversi settori in cui trovano largo impiego altre tecnologie (convenzionali e non) pur presentando inconvenienti e limitazioni.

L'intera attività è stata svolta presso il Laboratorio del Centro di Ricerca Interuniversitario CIRTIBS (sede Napoli) dove la possibilità di poter disporre in un'ampia gamma di sorgenti (diverse per potenza erogata, lunghezza d'onda del fascio generato ed architettura) ha permesso lo studio di diversi materiali quali organici, metallici, ceramici e compositi.

La notevole esperienza acquisita anche in altri tipi di lavorazioni laser quali marcatura ed engraving è stata trasferita alle operazioni di taglio ottenendo risultati estremamente validi. È stato quindi possibile stabilire quale fosse tra tutte la sorgente laser più valida alla lavorazione di ogni singolo materiale trattato.

Quanto ottenuto può essere riassunto nei seguenti punti:

- L'utilizzo di sorgenti laser in regime impulsato in operazioni di taglio riduce decisamente il carico termico indotto sul materiale, rispetto ad una sorgente operante in regime continuo. Infatti, gli elevati valori di energia rilasciata in tempi così brevi sono in grado di determinare la vaporizzazione istantanea praticamente di ogni materiale riducendo così lo stress termico e la HAZ
- Il coefficiente di assorbimento di ogni singolo materiale è fortemente subordinato alla lunghezza d'onda della radiazione emessa ed non è quindi possibile lavorare in maniera ottimizzata materiali diversi con una sola sorgente.
- A seconda della potenza disponibile e dello spessore da lavorare, il taglio può avvenire per multi passata oppure per singola passata. Nel primo caso, per spessori elevati è necessario adeguare il piano di messa a fuoco man mano che si procede nella lavorazione, onde evitare eccessiva inclinazione delle superfici laterali (*taper angle*) del sentiero di taglio o peggio una riduzione dell'efficacia del processo.

- La formulazione di modelli empirici in grado di descrivere con accuratezza l'interazione laser-materia dipende fortemente dalla natura del materiale stesso.
- Nel taglio delle carboresine, il gas d'assistenza ha la funzione di allontanare il materiale vaporizzato durante la lavorazione, favorendo così la l'assorbimento del fascio.

Tra tutti i materiali trattati, particolare attenzione è stata dedicata al taglio dei materiali compositi, ed in particolare dei CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Plastic*). Il notevole interesse suscitato da questi materiali in diversi settori, infatti, richiede tecnologie di lavorazione alternative in grado di garantire standard qualitativi adeguati alle diverse esigenze.

In questo lavoro si è affrontato lo studio dell'influenza dei parametri di lavorazione nel taglio di laminati di 1.2 mm di spessore usando una sorgente a stato solido Nd:YAG di potenza nominale pari a 150 W (Mod. Rofin StarCut 150).

Lo scopo è stato quello di studiare la qualità della lavorazione mirando a correlare le caratteristiche del taglio (geometrie e difetti) con le condizioni operative (velocità del fascio, durata dell'impulso, energia dell'impulso, potenza media, gas d'assistenza).

Alla base dei risultati, le principali conclusioni sono:

- La sorgente laser usata ben si presta al taglio di laminati CFRP di questo spessore (con velocità di taglio di circa 16 mm/s con una potenza di 140 W).
- È possibile stabilire una duplice corrispondenza lineare tra la massima velocità di taglio e la potenza media erogata e tra il minimo fattore di ricopertura e l'energia impulsiva.
- Relativamente ai difetti, non è stata riscontrata presenza di delaminazione. In alcuni casi (soprattutto per quelli a bassa energia impulsiva) è stata notata la presenza di pull-out e/o bridging.
- L'estensione della HAZ è legata al fattore di ricopertura tramite una legge di tipo esponenziale, in funzione della durata dell'impulso; mentre è legata alla densità di energia totale tramite una legge di tipo logaritmico e ciascun andamento è funzione dell'*on-time*.
- Nel caso dell'azoto, per fattori di ricopertura superiori al 98% si è assistito ad un repentino aumento dell'estensione della HAZ. Questo perché elevate frequenze

di ripetizione tendono ad approssimare un funzionamento in regime continuo che, come noto, induce un danno termico maggiore indipendentemente dall'energia (e quindi dalla durata).

- La distribuzione della HAZ lungo lo spessore del laminato non è uniforme ma varia a seconda dell'orientazione delle fibre rispetto alla direzione del fascio laser. Come noto dalla letteratura, infatti, le fibre presentano un differente coefficiente di conduzione del calore, maggiore in direzione longitudinale e minore in direzione radiale.
- È stato possibile (per entrambi i gas utilizzati) prevedere l'estensione della HAZ in funzione di un unico parametro K che lega potenza media, velocità di taglio, frequenza di ripetizione e durata dell'impulso.
- Il gas di assistenza non sembra influenzare la qualità della lavorazione, sia in termini di geometria che di difetti.
- Lo studio ha dimostrato che la riduzione della durata dell'impulso è fondamentale nella gestione dei fenomeni di interazione. In particolare la riduzione della durata permette di agevolare la vaporizzazione del materiale consentendo di limitare l'apporto termico trasferito alla matrice e di conseguenza permette di ridurre l'estensione della HAZ.
- Quanto osservato conferma che i laser impulsati sono la soluzione più promettente per le operazioni di taglio dei laminati in CFRP. L'attuale tendenza del mercato a produrre laser impulsati sempre più potenti e con durate sempre più piccole fa presagire la possibilità di avere nuovi sviluppi di tale applicazione, anche su spessori maggiori.

BIBLIOGRAFIA

1. E. Capello: Le lavorazioni industriali mediante laser di potenza: la tecnologia, le applicazioni e i sistemi. Libreria Clup. Milano (2003).
2. D. Havrilla, P. Anthony: Laser cutting: process fundamentals and troubleshooting guideline. ROFIN-SINAR Laser (1999).
3. Ready J.F. et al (2001), "LIA Handbook of Laser Materials Processing" Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K.
4. www.lasit.it.
5. G.Thawari, J.K. Sarin Sundar, G. Sundararajan, S.V. Joshi: Influence of process parameters during pulsed Nd:YAG laser cutting of nickel-base superalloys. Journal of Materials Processing Technology 170, pagg. 229-239 (2005).
6. D. Herzog, P. Jaeschke, O. Meier, H. Haferkamp: Investigations on the thermal effect caused by laser cutting with respect to static strength of CFRP. International Journal of Machine Tools & Manufacture. No 48, pagg.1464-1473 (2008).
7. BASELL-ROFIN.
8. Leone C., Lopresto V. and De Iorio I.: Wood engraving by Q-switched diode pumped frequency doubled Nd:YAG green laser. Optics and Lasers in Engineering, Vol. 47/1 pp. 161-168, (2009).
9. C. Leone, V. Lopresto, N. Pagano, S. Genna, I. De Iorio: Wood Laser Machining using CO2 30W laser in CW and pulse regime. IPROMS - 2nd International Researchers Symposium, Ischia (2009).
10. S. Dauer, A. Ehlert, S. Buttgenbach: Rapid prototyping of micromechanical devices using a Q-switched Nd:YAG laser with optional frequency doubling. Sensors and Actuators 76.pagg. 381–385 (1999).
11. Black: Laser cutting speeds for ceramic tile: a theoretical-empirical comparison. Optics & Laser Technology 30 pagg. 95-101(1998).
12. C. Leone, V. Lopresto, N. Pagano, S. Genna, I. De Iorio: Laser cutting of silicon wafer by pulsed Nd:YAG source. IPROMS - 6th Virtual International Conference on Innovative Production Machines and Systems (2010).
13. Fraser C. Dear, J. D. Shephard, X. Wang, Julian D. C. Jones, D. P. Hand: Pulsed Laser Micromachining of Yttria-Stabilized Zirconia Dental Ceramic for Manufacturing. Int. J. Appl. Ceram. Technol., 5 [2] 188–197 (2008)].

14. J. Parry, F. Dear, R. Ahmed, J. Shephard, D. Hand: Fiber laser processing of thick yttria stabilized Zirconia. Heriot-Watt University - School of EPS, Riccarton, Edinburgh, EH14 4AS, United Kingdom (2007).
15. X. Wang, J.D. Shephard, F.C. Dear and D.P. Hand: Optimised nanosecond pulsed laser micro-machining of Y-TZP ceramics, *Journal of the American Ceramic Society*, 91(2), pagg. 391-397. (2008).
16. A.S. Kuar, B. Doloi, B. Bhattacharyya: Modelling and analysis of pulsed Nd:YAG laser machining characteristics during micro-drilling of zirconia (ZrO_2). *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46, pagg. 1301–1310 (2006).
17. Welding Technology Institute of Australia: Transmission Laser Welding of Plastics. April 2006.
18. E. Haberstroh, M. Hoffmann, R. Poprawe, F. Sari: Laser transmission joining in microtechnology. *Microsyst Technol* 12. pagg.632–639 (2006).
19. A. Fortunato, G. Cuccolini, A. Ascari, L. Orazi, G. Campana, G. Tani: Hybrid metal-plastic joining by means of laser. *Int. J Mater. Form. Vol. 3 Suppl 1*. pagg. 1131 – 1134 (2010).
20. F. Caiazzo, F. Curcio, G. Daurelio, F. Memola Capece Minutolo: Laser cutting of different polymeric plastics (PE, PP and PC) by a CO₂ laser beam. *Journal of Materials Processing Technology* 159. pagg. 279–285 (2005).
21. I.A.Choudhury, S.Shirley: Laser cutting of polymeric materials: An experimental investigation. *Optics & Laser Technology* 42, pagg. 503–508(2010).
22. L. Romoli, G. Tantussi, G. Dini: Layered Laser vaporization of PMMA manufacturing 3D mould cavities. *Annals of the CIRP Vol. 56/1/2007*.
23. C. Leone, V. Lopreso, F. Capece Minutolo, I. De Iorio, N. Rinaldi: Laser ablation of maskant used in chemical milling process for aerospace applications. *The XVIII International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers & High power lasers*. Sofia (settembre 2010).
24. S.Abrate, D.A. Walton: machining of composite materials. Part I: traditional methods. *Composites Manufacturing. Vol. 3, No 2* (1992).
25. S.Abrate, D.A. Walton: machining of composite materials. Part II: traditional methods. *Composites Manufacturing. Vol. 3, No 2* (1992).
26. A.Goeke, C. Emmelmann: Influence of laser cutting parameters on CFRP part quality. *Physics Procedia* 65. pagg 253-258 (2010).

27. A.A. Cenna, P. Mathew: Evaluation Of Cut Quality Of Fibre-Reinforced Plastics: A Review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 37, No 6, pagg 723-736 (1997).
28. C. Leone, V. Lopresto, I. De Iorio: Parametric studies on Q-Switched Nd:YAG laser cutting of CFRP thin sheets.
29. R. Negarestani, Lin Li, H. K. Sezer, D. Whitehead, J. Methven: Nano-second pulsed DPSS Nd:YAG laser cutting of CFRP composites with mixed reactive and inert gases. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Pagg. 1-14 (2009).
30. J. Mathew, G.L. Goswami, N. Ramakrishnan, N.K. Naik: Parametric studies on pulsed Nd:YAG laser cutting of carbon fibre reinforced plastic composites. *Journal of Materials Processing Technology* 89–90, pagg. 198–203 (1999).
31. A.A. Cenna, P. Mathew: Analysis and prediction of laser cutting parameters of fibre reinforced plastics (FRP) composite materials. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* No. 42, pagg. 105-13 (2002).
32. G. Caprino, V. Tagliaferri, L. Covelli: Cutting glass fibre reinforced composites using CO₂ laser with Multimodal-gaussian distribution. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 35, No 6, pagg 831-840 (1995).
33. G. Caprino, V. Tagliaferri: Maximum cutting speed in laser cutting of reinforced plastic. *International Journal of machine Tools e Manufacture* 28. pagg. 389-398 (1988).
34. C.T. Pan and H. Hocheng: Prediction of Laser-Induced Thermal Damage of Fiber Mat and Fiber MatUD Reinforced Polymers. *Journal of Materials Engineering and Performance*. Volume 7, pagg. 751-756 (1998).
35. E. Uhlmann, G. Spur, H. Hocheng, S. Liebelt, C.T. Pan: The extent of laser-induced thermal damage of UD and crossply composite laminates. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. Vol. 39 pagg. 639–650 (1999).
36. C. Leone, N. Pagano, V. Lopresto, I. De Iorio: Solid state Nd:YAG laser cutting of CFRP sheet: influence of process parameters on kerf geometry and HAZ. *Proc of 17th Int. Conf. on Composite Materials - ICCM-17*, 27 Jul 2009 - 31 Jul 2009, Edinburgh, pp. 1-10 (2009).
37. N. Pagano, C. Leone, V. Lopresto, I. De Iorio: Laser cutting of CFRP sheet by pulsed Nd:YAG source: Influence of pulse energy, pulse duration and overlapping

- on kerf geometry and HAZ. IPROMS - 6th Virtual International Conference on Innovative Production Machines and Systems (2010).
38. Lau W.S., Lee W.B., Pulsed Nd:YAG laser cutting of carbon fibre composite materials, Ann. CIRP 39/1, 1990, pp. 179–182.
39. W.S.Lau et al.: un-conventional machining of composite materials. Journal of Materials Processing Technology No 48, pagg.199-205 (1995).
40. P.Sheng, L. Cai: Predictive process planning for laser cutting. Journal of Manufacturing Systems. Vol. 17, No 2 (1998).
41. A. Stournaras, K. Salonitis, P. Stavropoulos, G. Crhyssolouris: Theoretical and experimental investigation of pulsed laser grooving process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology Vol. 44. pagg. 114-124 (2009).

RINGRAZIAMENTI

L'autore ringrazia sentitamente il Centro Interuniversitario di Ricerca sulle Tecnologie Innovative per i Beni Strumentali per tutto il supporto tecnico resosi necessario per la realizzazione del presente lavoro.

In particolare un doveroso e sentito ringraziamento va alla Prof.ssa Ing. Isabella De Iorio ed al Prof. Ing. Claudio Leone per tutto l'appoggio e la disponibilità concessami, nonché a tutto lo staff tecnico ed amministrativo del Centro di Ricerca della sede di Napoli, nelle persone di Prof.ssa Ing. Valentina Lopresto, Ing. Silvio Genna, Ing. Ilaria Papa, Ing. Josè Vargas e Sig.ra Grazia Esposito.

Ing. Nunziante Pagano